



Уральский
федеральный
университет

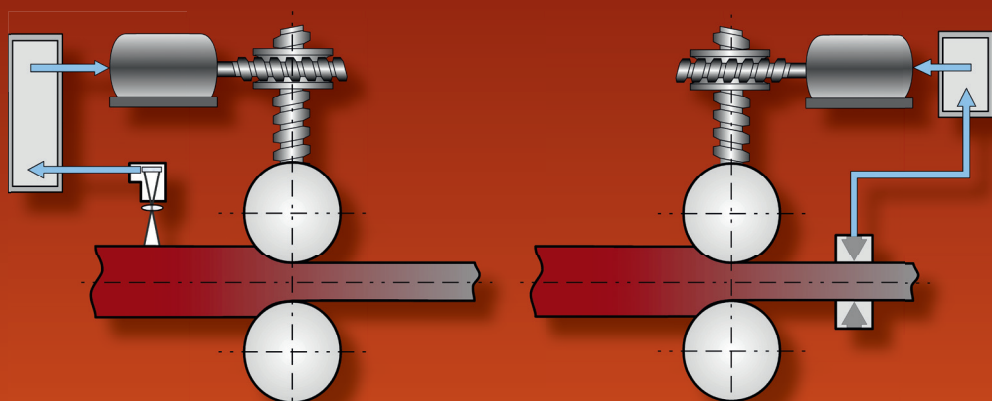
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт новых материалов
и технологий

С. И. ПАРШАКОВ
М. В. ЕРПАЛОВ

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И СИСТЕМАМИ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

С. И. Паршаков, М. В. Ерпалов

Основы управления техническими процессами и системами

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
в качестве **учебного пособия** для студентов вуза,
обучающихся по направлению подготовки
22.03.02, 22.04.02 — Металлургия
(специальность 05.16.05 —
Обработка металлов давлением)

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 669.012(075.8)

ББК 34.3-7я73

П18

Рецензенты:

кафедра «Мехатроника» ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения» (завкафедрой канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. Тарасян); д-р техн. наук, проф. О. С. Лехов (ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. Ю. В. Инатович

Паршаков, С. И.

П18 Основы управления техническими процессами и системами : учебное пособие / С. И. Паршаков, М. В. Ерпалов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 148 с.

ISBN 978-5-7996-2036-3

Приведены теоретические основы контроля и управления техническими процессами и системами. Изложены элементы теории систем и моделирования, сведения о первичных преобразователях информации. Значительное внимание уделено основным положениям статики и динамики систем автоматического регулирования, а также элементам цифровой автоматики. Даны сведения об устройстве и архитектуре микропроцессоров и программируемых логических контроллеров.

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки «Металлургия».

Библиогр.: 20 назв. Табл. 1. Рис. 67.

УДК 669.012(075.8)

ББК 34.3-7я73

ISBN 978-5-7996-2036-3

© Уральский федеральный университет, 2017

Предисловие

Системы автоматики и ее элементы нашли широкое применение в процессах прокатки,ковки,штамповки,трубного производства,прессования,а также волочения. В связи с этим изучение методов и систем контроля и управления технологическими процессами имеет крайне важное значение для успешного выпуска продукции общего и специального назначения. В работе рассмотрены принципы устройства и работы элементов систем автоматического управления и регулирования, методы расчета их характеристик, требования к выбору и настройке. Приведены сведения о представлении и обработке информации в системах автоматики.

Главной задачей данного учебного пособия является помощь в обучении базовым знаниям теоретических основ, практическим умениям и навыкам в области контроля и управления технологическими процессами; классификации и выбору приборов и других средств контроля и управления; принципам работы и устройств элементов автоматических и автоматизированных систем контроля и управления; методам определения характеристик систем контроля и управления; численному моделированию элементарных динамических звеньев и систем автоматического регулирования; принципам синтеза схем логического управления, а также основам разработки высокоэффективных и экономичных процессов обработки металлов давлением, в частности, относящихся к категории инновационных.

Основные определения

Объект управления (ОУ) — любое устройство, выполняющее обработку или преобразование вещества, энергии, информации, снабженное органами, которые позволяют изменять параметры обработки (преобразования). Например, это нагревательное устройство с возможностью получения требуемой температуры нагрева, двигатель под технологической нагрузкой с возможностью изменения частоты вращения, клеть прокатного стана с возможностью изменения раствора валков для получения заданной толщины полосы и др.

Контролируемый параметр — параметр, требуемое значение которого нужно получить или поддерживать. Это, например, температура в нагревательном устройстве, частота вращения двигателя, толщина прокатываемой полосы.

Обратная связь — информационная связь, обеспечивающая реакцию ОУ на изменение контролируемого параметра, например, увеличение подачи газа, если температура в печи опустилась ниже требуемого значения.

Инерционность — свойство объекта сохранять свое состояние во времени и пространстве при отсутствии внешних воздействий. Мерой этого свойства могут быть, например, масса, момент инерции, теплоемкость.

Чувствительность — свойство объекта давать ответ (реакцию) на внешнее воздействие. Чем чувствительнее объект, тем более слабые воздействия будут вызывать его реакцию.

1.

Общие сведения об управлении техническими процессами и системами

1.1. Автоматизация контроля и управления

Под **контролем** мы будем понимать регистрацию и обработку информации о параметрах технологического процесса, качестве продукции, состоянии рабочих машин и инструмента.

Под **управлением** будем понимать воздействие на аппараты и органы рабочих машин, изменяющее их состояние. Различают ручное, автоматизированное и автоматическое управление. При ручном управлении воздействие осуществляется путем непосредственного изменения положения и состояния управляющих органов машины за счет физических усилий работника. Например, на стане 130 лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета для задания величины обжатия валки перемещают, вращая нажимной винт. При автоматизированном управлении работник не прикладывает физических усилий. Устанавливая положение рукояток, верньеров, нажимая кнопки, оператор отдает команды промежуточному устройству — исполнительному механизму (сервомеханизм). Исполнительный механизм перемещает органы управления машины или изменяет состояния аппарата. При автоматическом управлении человек полностью исключен из цепочки действий по изменению состояния или перемещению органов управления и принимает участие только при наладке системы или подготовке алгоритма управления.

Совокупность мероприятий, обеспечивающих исключение человека из технологического процесса, называют **автоматизацией**. За человеком остаются функции настройки систем управления, а также наблюдения за функционированием автоматических и автоматизированных устройств. В дальнейшем устройства (машины, системы), действующие без участия человека, мы будем называть автоматическими. Системы, в которых большинство операций выполняются без участия человека, но которые органически включают в свой состав оператора, выполняющего часть функций, не обеспеченных автоматикой, будем называть автоматизированными. Технологические процессы металлургического производства — прокатка, волочение, прессование,ковка, штамповка, плавка, литье и другие — имеют тенденцию перехода ко все более автоматизированным и в идеале к автоматическим системам контроля и управления.

1.2. Основные задачи и направления автоматизации контроля и управления

Совершенствованием и использованием систем контроля и управления на металлургических предприятиях, как правило, занимаются специалисты-технологи при участии привлеченных специалистов — электротехников, прибористов, электронщиков и экономистов. Технолог чаще выступает в роли системного интегратора, объединяющего усилия привлеченных специалистов для решения поставленной задачи. Особая роль в деле совершенствования систем отводится специалистам, осуществляющим проектирование технологических процессов, машин, инфраструктуры цеха и предприятия. Решения, закладываемые на этапе проектирования, определяют не только возможность применения систем контроля и управления, но и их структуру, затраты и эффективность. При этом достигается решение ряда важных задач:

- 1) снижение производственных затрат, т. е. повышение эффективности производства. Последнее достигается:
 - за счет экономии энергетических ресурсов и материалов, например, при использовании оптимальных режимов работы оборудования;

- за счет уменьшения доли заработной платы в себестоимости продукции;
- ликвидации или сокращения дорогостоящего обслуживания, в частности, ночных смен, работы во вредных или опасных условиях, ручного труда;
- повышения выхода годного, снижения расходных коэффициентов;
- уменьшения простоев, увеличения срока службы инструмента и оборудования;

2) обеспечение безопасности жизнедеятельности:

- за счет вывода работников из опасных зон, опасных помещений путем применения дистанционного управления или замены рабочего машиной;
- использования систем блокировки и защиты;
- жесткого контроля за протеканием опасных химических реакций и процессов, например, при использовании водородных защитных сред при термообработке или щелочных расплавов для травления;
- использования систем автоматического пожаротушения, автоматического сброса давления при нештатных ситуациях;
- использования замкнутых циклов потребления воды и других жизненно важных ресурсов;

3) повышение производительности труда:

- путем более эффективного использования оборудования;
- уменьшения числа работающих на единицу готовой продукции;
- совмещения операций и профессий;
- увеличения скоростей рабочих машин и транспорта;
- сокращения затрат времени на замену инструмента и настройку;

4) повышение качества готовой продукции достигаемое:

- за счет введения непрерывного контроля за технологическими режимами;
- автоматического контроля за состоянием технологического инструмента и автоматизации его замены;
- внедрения автоматического неразрушающего контроля в потоке;

- за счет регулирования режимов прокатки, волочения, прессования, нагрева и других технологических операций;
- жесткого всеобъемлющего входного контроля качества заготовки и вспомогательных материалов;
- адаптации режимов процессов к изменяющимся условиям;

5) обеспечение гибкости производства:

- за счет использования автоматически перенастраиваемых поточных линий и агрегатов непрерывного цикла;
- автоматизации замены технологического инструмента;
- ликвидации промежуточных инстанций между проектированием и изготовлением;
- использования логистики для контроля за движением заготовки, инструмента и вспомогательных материалов.

Совершенствование управления технологическими процессами в металлургии развивается по трем основным направлениям. Это — совершенствование технологии, совершенствование оборудования и совершенствование элементов систем контроля и управления.

Первое направление, связанное с совершенствованием технологии, включает решение следующих задач:

- переход от дискретных неоднородных процессов к непрерывным однородным, выполняемым в потоке;
- обеспечение устойчивости и надежности технологических режимов;
- обеспечение резервов по расходным материалам, мощностям рабочих машин и энергоресурсам;
- расчленение сложных операций на примитивы — простые действия или движения, сводимые к последовательностям включений и выключений исполнительных механизмов и устройств;
- алгоритмизация технологического процесса — представление его в виде линейного, циклического или древообразного непротиворечивого корректного алгоритма, предусматривающего необходимые ветвления в зависимости от условий или варианта задания;
- разработка рациональных (оптимальных) технологических режимов и определение допустимых диапазонов изменения технологических параметров;
- выявление важнейших факторов, определяющих качество и производительность;

- упрощение операций — замена сложных и громоздких технологических операций на простые четко определенные последовательности движений, действий;
- совмещение технологических операций во времени и пространстве, а также разработка временных диаграмм выполнения операций;
- разработка требований к качеству заготовки и вспомогательных материалов, обеспечивающих надежность и устойчивость выполнения технологических операций;
- разработка методов контроля технологических параметров и режимов;
- разработка методов учета металла и вспомогательных материалов, энергетических ресурсов;
- разработка методов мониторинга технологического процесса, обеспечивающего регистрацию значений технологических параметров и их привязку ко времени и исполнителю.

Направление совершенствования оборудования предусматривает:

- упрощение конструкции путем широкого использования стандартных узлов и деталей;
- обеспечение модульности рабочих и транспортных машин путем использования строительных и конструкторских модулей;
- применение эффективных способов подвода энергии и движения — использование гидравлики и пневматики, использование вариаторов и планетарных редукторов в механических системах;
- улучшение управляемости и гибкости оборудования, например, замену групповых приводов рабочих клеток индивидуальными, установку дополнительных исполнительных механизмов;
- при проектировании оборудования, выделение контрольных точек в опасных и тяжело нагруженных зонах, обеспечение возможности размещения датчиков;
- повышение живучести оборудования, использование равнопрочных деталей;
- обеспечение устойчивости работы оборудования;
- обеспечение самоблокировки машины при переходе в нештатный или нерасчетный режим работы;
- обеспечение резервов по мощностям, моментам, усилиям, прочностным характеристикам и размерам обрабатываемых изделий;
- дублирование критически важных элементов оборудования.

Направление совершенствования элементов систем контроля и управления предусматривает:

- переход к цифровой форме представления информации для всех элементов системы;
- замену централизованных систем контроля и управления на распределенные сетевые;
- использование новых помехоустойчивых средств передачи информации между элементами системы;
- использование быстродействующих микропроцессорных средств обработки информации;
- существенное увеличение точек контроля за состоянием технологического оборудования и параметрами технологического процесса, использование для этой цели современных систем датчиков, выполненных методами интегральных и нанотехнологий;
- использование новых средств визуализации информации — защищенных операторских панелей, дисплеев, позволяющих представлять информацию в графической форме, активных мнемосхем, табло;
- использование современных алгоритмов обработки информации — быстрого преобразования Фурье для анализа сигналов, методов идентификации и оптимизации при выработке управляющих воздействий, алгоритмов нечеткой логики при управлении в условиях неопределенности;
- повышение надежности всех элементов устройств;
- использование универсальных покупных средств — программируемых логических контроллеров, стандартных сервоприводов, стандартного гидравлического и пневматического оборудования, универсальных датчиков;
- обеспечение мониторинга и документирования всех входных параметров систем управления и выработанных ими управляющих воздействий.

Перечисленные задачи и направления не исчерпывают всего развития систем контроля и управления в цехах обработки металлов давлением, но помогут инженеру-технологу при выборе вариантов технологии и оборудования.

2. Структурная и функциональная схемы управляемого объекта

2.1. Элементы теории систем и моделирования

При изучении дисциплины мы будем использовать термины «система», «модель», «прямая и обратная связь», «оптимальное управление» и другие, подробно изучаемые в дисциплинах, относящихся к теории систем. В этой главе будут даны краткие сведения, необходимые для представления и моделирования систем контроля и управления. Приведем несколько важных понятий.

Система (от греческого «целое, составленное из частей», «соединение») — множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. Этот термин имеет массу различных толкований, поэтому в следующей главе мы существенно сузим для дальнейшего использования содержание этого понятия, ограничившись лишь системотехническим подходом. Там же будет введено определение системы через ее системообразующие свойства.

Модель — широкое и неоднозначное понятие. В широком смысле модель представляет собой любой образ, мысленный или условный *аналог* оригинала, используемый в качестве заместителя или представителя, изображение, описание, схему, график, план, карту, форму, макет, упрощенную уменьшенную (прокатный стан) или увеличенную (кристаллическая решетка из проволоки и шариков) копию процесса или явления. Мы ограничимся лишь конструктивным содержанием понятия «модель», сведя его к триаде Калмана.

Оптимум (от латинского «наилучшее») — наилучший вариант решения задачи или путь достижения цели при данных условиях и ресурсах. Понятие содержит в себе огромное противоречие. Нетрудно понять, что «наилучших» решений вообще не существует. Отношение к решению определяется выбранным критерием, который диктуется поставленной при принятии решения целью. Поскольку цель может быть плохо определена или существует несколько целей, которые должны достигаться одновременно, постольку оптимум иногда оказывается весьма далеким от «наилучшего» решения. Компромиссные или универсальные решения никогда не бывают оптимальными в исходном смысле этого слова. То же самое можно сказать о решениях, принимаемых при неопределенности условий их реализации, например о запасе топлива на зиму.

Из перечисленных терминов и определений главным, краеугольным камнем в инженерной практике является модель. Она является основой — заместителем (представителем) для изучения любых объектов, конструирования алгоритмов и выработки решений. Под **моделированием** мы будем понимать не только построение моделей для исследуемых объектов, но и использование последних для уточнения характеристик, рационализации конструирования и выбора наилучшего по определенному критерию варианта системы или варианта ее функционирования. В зависимости от цели моделирования варианты моделей могут быть весьма различны.

В широком смысле **системная модель** — наиболее общее описание объекта при отвлечении от его физических свойств, размеров и характеристик. В системной модели выделяются только элементы, из которых состоит объект, и связи между ними. Системная модель может быть одной и той же для разных объектов или процессов.

В инженерной практике большое распространение получили **математические модели**. Это описание объекта или его движения в терминах математики в виде алгебраических, дифференциальных, интегральных и других структур. Так, процесс пластической деформации может быть описан системой дифференциальных уравнений в частных производных (теория пластичности) или обыкновенными расчетными формулами (инженерные методы ОМД, например, формула А. И. Целикова). В связи с быстрым развитием компьютерной техники математические модели занимают все большую нишу. Несмотря на это, сохраняют свое значение и физические модели, замещающие объект моделирования набором аппаратных средств.

При принятии технических решений говорят о необходимости оптимизационных моделей, которые выделяют в отдельный класс. Специфика этих моделей определяется наличием критерия оптимальности и управляющих воздействий. Кроме того, оптимизационная модель предполагает ограничения по ресурсам управления.

2.1.1. Определение системы. Связи. Структура

Моделирование технических систем осуществляется на основе представления объекта моделирования как системы. Ранее упоминалось, что термин «система» трактуется очень широко и неопределенно, что создает трудности при конструировании полезных для практического использования моделей. В дальнейшем будем рассматривать лишь частный класс систем — технические и технологические системы. Для этого класса система может быть жестко определена через четыре системообразующих свойства [1]. Итак, системой мы будем называть объект, у которого определено по меньшей мере четыре свойства:

- целостность и членимость;
- наличие существенных связей;
- наличие организации;
- наличие интегративного качества.

Целостность означает, что рассматриваемый объект как-то выделен среди всех остальных, то есть его можно наделить именем, номером или индексом. Целостные объекты можно считать, перечислять, взвешивать. Мы называем совокупность узлов, аппаратов, транспортеров, трубопроводов, двигателей, клеток «прокатным станом» и можем говорить, что в цехе установлен один, два или более станов.

Все объекты, не относящиеся к моделируемому, составляют внешнюю среду. Следовательно, при установлении целостности мы фактически определяем границу между моделируемым объектом и внешней средой. Это не всегда простая задача. В частности, сложная проблема возникает при определении границ объекта «очаг деформации» в процессахковки, прокатки волочения. Частично границы в этом примере определены геометрией инструмента, а для установления границ между недеформируемой и деформируемой зонами в объеме тела приходится прибегать к различного рода допущениям и соглашениям. Аналогично описанному границы объекта «прокатный стан» тоже весьма

условны. В некоторых случаях нагревательное устройство относят к стану, в других — к внешней среде. В большинстве случаев выбор границ моделируемого объекта определяется целью моделирования и может быть осуществлен формально.

В любом случае без жесткого определения границ дальнейшее моделирование невозможно. Установив границы, мы получаем возможность наблюдать движение вещества, энергии и информации через объект (рис. 1).

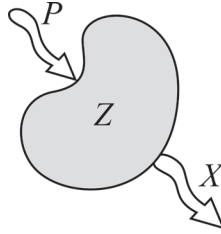


Рис. 1. Объект моделирования и внешняя среда

В наиболее общем случае объект подвергается энергетическим, вещественным и информационным воздействиям. Например, при прокатке к прокатному стану подается вещество в виде заготовки, смазки, охлаждающих жидкостей; энергия — с нагретым металлом, электричеством для привода; информация — с калибровкой инструмента, таблицей прокатки. Эти воздействия могут изменяться во времени или быть статическими. Вся совокупность воздействий внешней среды на объект образует входной процесс

$$P = \begin{pmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ \dots \\ p_k(t) \end{pmatrix},$$

где $p_1(t)$, $p_2(t)$, ..., $p_k(t)$ — потоки вещества, энергии и информации из внешней среды в объект моделирования, которые в общем случае могут быть функцией времени t ; k — размерность выходного процесса. Очевидно, что в результате этих воздействий произойдут изменения в объекте. Может измениться его форма, температура, кристаллическая решетка, скорости движения составляющих относительно друг друга, взаимное расположение составляющих и тому подобное.

Эти изменения в общем случае могут происходить по-разному для разных моментов времени, тогда совокупность всех изменений составит множество Z , называемое процессом в пространстве состояний, или просто состоянием объекта моделирования,

$$Z = \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \dots \\ z_n(t) \end{pmatrix},$$

где n — размерность объекта управления.

В теории пластичности обычно рассматривают деформированное и напряженное состояния деформируемого тела. Первое характеризует изменение формы, перемещения частиц тела и скорости этих перемещений. Второе — возникающие при этом напряжения. Вследствие изменения состояния возникает реакция объекта на воздействие. Объект может передать во внешнюю среду измененные вещество, энергию и информацию. Например, прокат, водяной пар, окалина будут представлять вещественную составляющую, выделение тепла в атмосферу цеха, нагрев охлаждающей жидкости — энергетическую, размеры проката и другие его числовые характеристики — информационную. Совокупность выходных воздействий образует новое множество X , состоящее из потоков вещества, энергии и информации из объекта в окружающую среду. Это множество называют выходным процессом

$$X = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_m(t) \end{pmatrix},$$

где m — размерность выходного процесса.

Следует отдельно подчеркнуть отношение между объектом моделирования и субъектом, осуществляющим моделирование. Поскольку взаимодействие с объектом возможно лишь через его входы и выходы, находящийся вне объекта наблюдатель может судить о процессах в пространстве состояний лишь путем теоретического анализа вход-

ного и выходного процессов. Например, измеряя напряжения и перемещения на границах деформируемого тела (граничные условия), можно теоретически рассчитать его напряженное и деформированное состояние.

Обратной стороной целостности является **членимость**. Под ней имеется в виду, что любой целостный объект может быть расчленен на самостоятельные части — элементы. Стан можно разобрать на узлы и детали, процесс разложить на отдельные действия и движения. Каждый элемент в свою очередь является целостным объектом со своим входным процессом, состоянием и выходным процессом (рис. 2). Элементы могут обмениваться между собой веществом, энергией и информацией.

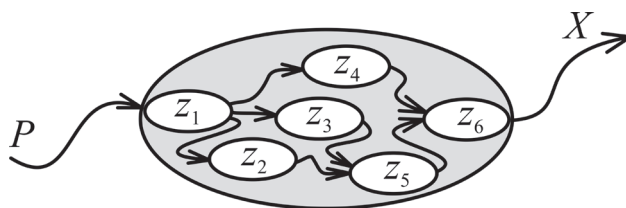


Рис. 2. Объект моделирования и его элементы

Кроме того, элементы, расположенные на границе объекта моделирования, могут обмениваться энергией, веществом и информацией с внешней средой. Элементы могут быть определенным образом размещены относительно друг друга или относительно внешней среды, например, упорядочены по размеру или массе. Они могут зависеть друг от друга, например, воздействие на один элемент вызовет реакцию другого. Все это объединяет элементы в целостное образование и носит наименование связей.

Связь — это или физический канал, по которому осуществляется обмен веществом, энергией, информацией между элементами объекта моделирования, а также между объектом моделирования и внешней средой; или отношение между элементами объекта моделирования, а также между объектом моделирования и внешней средой.

Связи могут иметь направление или быть ненаправленными (рис. 3). По направлению различают следующие типы связей: ненаправленные, прямые (В зависит от А или А зависит от В), обратные и контрсвязи.

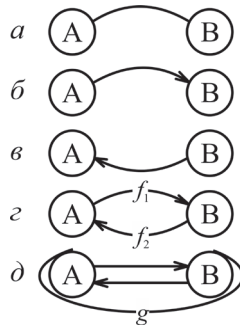


Рис. 3. Классификация связей по направлению:

a — ненаправленные; $б, в$ — прямые; $г$ — обратные; $д$ — контрсвязи

Подробнее разберем разницу между прямыми и обратными связями. Обратная связь существует тогда и только тогда, когда есть прямая связь. Она является следствием прямой связи, реакцией на нее. Если А воздействует на В (рис. 3, связь f_1) и вследствие этого возникает ответная реакция f_2 , представляющая собой воздействие В на А, то f_2 — обратная связь. Контрсвязи отличаются тем, что ни одна из этой пары не является следствием другой. Причина связей лежит вне пары А и В. Например, две детали стянуты болтовым соединением. В результате одна деталь действует на другую с силой F и другая деталь тоже воздействует на первую с той же самой силой. Однако причиной реакции является не действие одной детали на другую, а напряжения упругой деформации болта g . Точно так же груз, неподвижно лежащий на опоре, давит на нее силой P , и опора давит на груз с той же самой силой. Причина, земное тяготение, здесь опять вне пары груз — опора.

Связи бывают физически наполненные и абстрактные — отношения. По наполнению различают вещественные, энергетические и информационные связи. Абстрактные связи — это отношения порядка, включения и зависимости. Последние принято называть функциональными связями. Говорят, что между элементами А и В определена функциональная связь, если между свойствами a и b этих элементов имеется взаимно однозначное соответствие $b = f(a)$. При этом может быть указано направление: В зависит от А (А воздействует на В) (рис. 4).

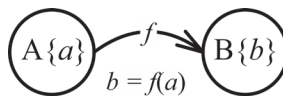


Рис. 4. Функциональная связь

В любом объекте всегда присутствуют те или иные связи. Однако при моделировании представляют интерес лишь существенные связи. Чтобы установить, является ли связь существенной, необходимо ввести количественные характеристики и назначить пороговое значение для этих характеристик. Связи, характеристики которых меньше порогового значения, считают несущественными и ими пренебрегают при моделировании. Такими количественными характеристиками могут служить величины потоков вещества, энергии и информации. Характеризовать связь может также величина работы (энергии), необходимой для ее разрушения. Эти характеристики мы будем условно называть «силой» или «мощностью» связи. Под термином «сила», как правило, понимают интегральную характеристику, под «мощностью» — дифференциальную. Для корректной количественной оценки силы и мощности обычно переходят к безразмерным величинам, приводя их отрезку $[0, 1]$. Простейшим способом приведения является переход с использованием характерных величин. Пусть между элементами объекта реализуется k вещественных связей с силами $\{f_1, f_2, \dots, f_k\}$. Кроме того, известны характерные величины — минимальная сила f_{\min} и максимальная f_{\max} . В таком случае безразмерная величина, рассчитанная по формуле $\hat{f}_i = \frac{f_i - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$, приобретает значения в диапазоне от 0 до 1 и может быть использована для оценки силы (или мощности) i -й связи. Обычно в качестве порогового значения используют инженерные оценки, связанные с уровнем риска. Для простых ситуаций, не связанных с безопасностью для жизни людей, принимают пятипроцентный уровень риска. Со статистической точки зрения в 5 % случаев существенная связь будет признана несущественной и отброшена. При отсутствии статистической оценки часто считают несущественной связь, сила (мощность) которой меньше пяти процентов от средней силы или мощности связей в объекте.

Связи-отношения тоже можно оценивать их силой или мощностью. Так отношения порядка «<», «>», «=» являются сильными связями, а «≤», «≥», «≠» — слабыми. Действительно, первые диктуют порядок элементов жестко, а вторые допускают неопределенность. Аналогично оцениваются связи включения: связи $a \in A$, $B \subset A$, $A \supset B$ являются сильными, а $a \notin A$, $B \not\subset A$, $A \subseteq B$ — слабыми.

Мощность функциональных связей может быть количественно оценена для любого момента времени при помощи коэффициента чув-

ствительности. Он показывает, как сильно меняется свойство b элемента В при изменении свойства a элемента А (рис. 4):

$$\frac{db}{dt} = \frac{df}{da} \bigg|_{t=t^*} \frac{da}{dt}.$$

Частная производная $\frac{df}{da} \bigg|_{t=t^*}$, подсчитанная для момента времени $t = t^*$ и приведенная к безразмерной форме, называется **коэффициентом чувствительности**. Абсолютное значение коэффициента чувствительности характеризует мощность функциональной связи в момент времени $t = t^*$.

По коэффициентам чувствительности можно сравнить, например, мощности связей каждого из двух элементов с третьим (рис. 5).

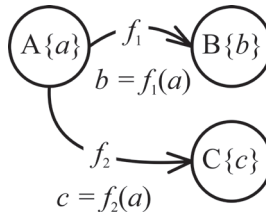


Рис. 5. Сравнение мощности функциональных связей

Если, к примеру, $\left| \frac{df_1}{da} \right|_{t=t^*} > \left| \frac{df_2}{da} \right|_{t=t^*}$, то мы вправе утверждать, что меж-

ду элементами А и В существует более мощная связь в момент, чем между элементами А и С. Точно так же, определив мощности всех функциональных связей объекта, можно вычислить их среднее значение и, исходя из уровня риска, сделать выводы о существенности или несущественности отдельных связей. Эти выводы, однако, будут справедливы только для момента времени $t = t^*$.

Некоторую сложность вызывает оценка силы или мощности информационных связей. Информацию можно копировать. Имея один блок информации на входе, можно каждому элементу объекта передать этот блок без малейших потерь. Кроме того, для некоторых элементов эта информация окажется полезной, для других — просто будет шумом, и мощность (сила) информационной связи окажется различной несмотря на то, что все элементы получили как бы одну и ту же информацию. Поэтому в теории информации принято оцени-

вать количество по уменьшению энтропии (степени неопределенности) приемника. Если степень неопределенности приемника уменьшилась вдвое (получили ответ на вопрос, на который существует только два ответа: «да» или «нет»), то говорят, что приемник получил один бит информации. В общем случае силу информационной связи q в битах можно подсчитать по простой формуле $q = \log_2 \frac{E_1}{E_2}$, где E_1 — эн-

тропия приемника до получения информации; E_2 — после получения. Мощность связи (бит/с) может быть найдена путем дифференцирования величины q по времени.

Теперь, когда определены количественные оценки силы и мощности связей, можно уточнить условие принадлежности элемента системе и, следовательно, формализовать определение целостности. Элемент является внутренним элементом объекта, если суммарная мощность (сила) его связей с другими элементами объекта больше, чем суммарная мощность (сила) его связей с элементами, не принадлежащими объекту (с внешней средой). Критерием принадлежности может служить величина отношения суммарной мощности (силы) связей элемента k с другими элементами объекта к суммарной мощности (силе) связей элемента k с элементами внешней среды

$$w_k = \frac{\sum_{i=1}^m \tilde{f}_{ki}}{\sum_{j=1}^n \tilde{f}_{kj}},$$

где m — количество связей с внутренними элементами объекта; n — количество связей с внешними элементами объекта; \tilde{f}_{ki} — мощность (сила) связей с внутренними элементами; \tilde{f}_{kj} — мощность (сила) связей с внешними элементами. Если $w_k > 1$, то элемент k принадлежит объекту; $w_k < 1$ — элемент k относится к внешней среде; $w_k = 1$ — элемент k находится на границе объекта и внешней среды. Знаком « \sim » обозначено, что соответствующие сила или мощность связи представлены в безразмерной форме.

Связи определяют место элемента относительно других элементов объекта моделирования. Элементы рабочей клетки жестко упорядочены в пространстве. Подшипник посажен на шейку вала и установлен в подушку, подушка размещена в станине и прижата к уравнове-

шивающему устройству нажимным винтом, который в свою очередь образует винтовую пару с гайкой нажимного винта. Последовательность можно продолжать.

Технологические операции жестко упорядочены во времени. Нагрев производится до подачи заготовки на входной рольганг стана горячей прокатки, охлаждение — после прокатки, правка — после охлаждения. Некоторые операции могут осуществляться с перекрытием. В этом случае требования к точности назначения времени начать операцию и к ее продолжительности становятся еще более жесткими.

Рассматривая любой объект моделирования, обнаруживаем, что его составляющие упорядочены в пространстве или во времени. Эта упорядоченность сохраняется при замене элементов другими. Так, подшипники, валки, нажимные винты и даже станины рабочей клетки могут неоднократно заменяться в течение срока эксплуатации стана, а рабочая клетка остается все той же. В автомобиле «Жигули» первого выпуска заменили кузов, двигатель, коробку передач, топливную и электрическую системы. Деталей от исходного автомобиля можно и не найти, однако он по-прежнему остался автомобилем «Жигули» первого выпуска, а не превратился в «Калину». Клетки человеческого организма в течение жизни полностью обновляются 30–40 раз. Однако, встретив хорошо знакомого человека через 10 лет разлуки, радостно кричим: «А, Вася!», хотя у этого Васи может уже и не быть ни одной молекулы от того Васи, которого мы знали. Что сохранилось у этих трех различных объектов? Взаимное расположение составляющих — деталей, узлов, костей, клеточных конгломератов, молекулярных конструкций. Отвлекаясь от физической сущности элементов, можно утверждать, что неизменными остались места их размещения в объекте. Место каждого элемента зафиксировано его связями с другими элементами объекта. Это взаимное расположение элементов в пространстве и времени и называется **организацией объекта**. Наличие организации проявляется в снижении энтропии объекта по отношению к энтропии набора его составляющих.

Организация объекта описывается его структурой. Под структурой мы будем понимать устойчивую упорядоченность элементов и связей объекта в пространстве и во времени. В зависимости от количества связей и взаимного расположения элементов различают несколько типов структур. Структура, в которой выход первого элемента соединен со входом второго, выход второго — со входом третьего, и т. д., и вход

первого элемента является входом в объект, а выход последнего является выходом из объекта, образуют линейную структуру (рис. 6, *а*). Если в линейной структуре у некоторых элементов сформировать дополнительные выходы и к этим выходам присоединить новые линейные структуры, то получим новый тип структуры, называемый скелетной структурой (рис. 6, *б*). Действительно, эта структура напоминает скелет: элементы z_1, z_2, z_3, z_4 образуют «хребет» (backbone), элементы b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 — «ребра» объекта. На рисунке приведен простейший случай, когда каждое ребро состоит из одного элемента. В реальных объектах «ребро» может содержать значительно большее количество элементов и даже может быть не линейной, а скелетной структурой. В последнем случае ребро называют ветвью, а структуры, содержащие ветви, называют деревом. Вырожденная скелетная структура, у которой «хребет» состоит только из одного элемента, носит название централистской, или ядерной.

И, наконец, структура, в которой каждый элемент связан с каждым (рис. 6, *в*), называется идеальной сетевой структурой. Сетевая структура является наиболее устойчивой. Она сохраняет функциональность как при разрушении любой связи, так и при разрушении любого элемента.

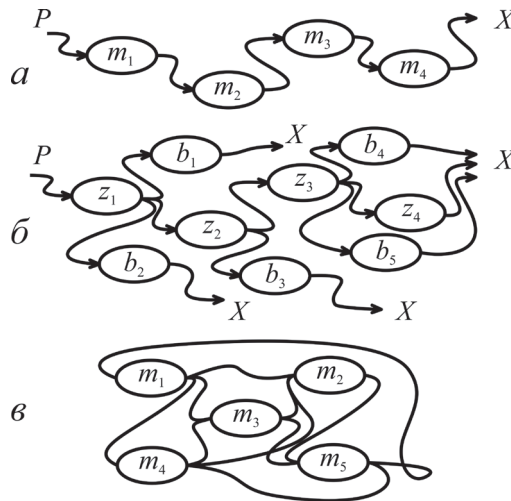


Рис. 6. Типы структур:

а — линейная; *б* — скелетная; *в* — сетевая

Наименее надежна централистская структура. Обмен веществом, энергией и информацией между элементами осуществляется через

ядро, поэтому при увеличении числа элементов уменьшается сила связей, и структура деградирует вплоть до распада. При разрушении ядра — единственного элемента «хребта», объект рассыпается на несколько несвязанных между собой фрагментов. Скелетная и линейная структуры тоже подвержены фрагментации, но, в отличие от ядерной, распадаются на более жизнеспособные фрагменты, которые могут частично выполнять некоторые функции исходной системы.

Все типы структур находят широкое распространение. Так, прокатный стан часто представляет собой линейную структуру. Газопровод с подключенными к нему потребителями образует скелетную структуру. Электрические, коммуникационные и информационные структуры уже приближаются к сетевым. Кластерные вычислительные комплексы, мультипроцессорные суперкомпьютеры, распределенные системы контроля и управления можно представить в виде очень развитых сетевых структур. Радиостанция и связанные с ней на фиксированной частоте передатчики — типичная ядерная структура.

Еще один тип структур часто встречается при реализации управления. Это иерархические структуры, в которых одни элементы содержат в себе другие, последние включают следующие элементы, образуя «матрешку». Число ступеней в такой иерархии (уровень вложенности) может быть достаточно большим, однако с увеличением числа ступеней структура становится все более и более слабой и может быть разрушена изнутри.

Хотя структуры — наиболее прочное образование в объекте, тем не менее они тоже подвержены изменениям во времени. По поведению структуры во времени различают следующие типы структур:

- 1) стабильные — число связей и элементов не меняется во времени. Вследствие старения или износа элементов качество структуры снижается (примеры: машина, человек);
- 2) развивающиеся — количество связей и (или) элементов изменяется. В зависимости от изменений выделяют:
 - интенсивные структуры, в которых сила (мощность) связей элементов увеличивается со временем, качество структуры повышается;
 - редуцирующие структуры, в которых количество элементов уменьшается при сохранении силы (мощности) связей между элементами объекта, качество структуры при этом или сохраняется, или слегка повышается;

- деградирующие структуры, в которых с течением времени уменьшается сила (мощность) связей элементов с другими элементами объекта, что, в соответствии с предыдущими выводами, приводит к потере элементов и постепенному разрушению объекта.

Четвертое системообразующее свойство объекта — наличие интегративного качества. Термин «интегративный» происходит от латинского *integrate* — объединять. **Интегративное качество** — это такое качество, которое присуще только объекту в целом, но не свойственно ни одному из его элементов в отдельности. Это новое качество, которое возникает у объекта, когда все его элементы соединены связями в единое целостное образование.

Представим ситуацию: на стенде станина рабочей клетки, рядом валки, подушки, разобранный нажимное устройство, трансмиссии, невдалеке двигатель и еще масса различных деталей и узлов. А теперь все это соберем в соответствии с чертежом и установим в линию стана. Появилось новое качество объекта — деформировать, прокатывать металл.

Объект, у которого установлены четыре системообразующих свойства, будем в дальнейшем называть **системой**. Элементы этого объекта, для которых также определены эти четыре свойства, — **подсистемами**.

Создание моделей, обеспечивающих адекватное описание объекта, базируется на системном подходе. В основе системного подхода к моделированию лежит рассмотрение объекта моделирования как системы. Это означает, что инженер, осуществляющий моделирование, должен раскрыть целостность и членимость объекта, проанализировать все многообразие связей и выделить среди них существенные, представить структуру и обнаружить интегративное качество.

Общий порядок моделирования можно представить следующим образом:

- 1) формулировка цели моделирования;
- 2) анализ объекта моделирования как системы, создание системной модели;
- 3) переход от системной модели к конструктивной, количественной;
- 4) испытания модели и интерпретация результатов.

Первый шаг определяет и вид модели, и аппарат моделирования. Понятно, что модель стана для определения экономических показателей его работы будет отличаться от модели стана для оценки возможности выпуска более тяжелого вида проката. В первом случае внимание будет направлено на расход энергии и материалов, скорости прокат-

ки, частоту и сложность ремонтов и обслуживания. Во втором случае нужно будет оценить прочностные характеристики, резервы мощности, возможность использования новых калибровок.

На втором шаге устанавливают границу между объектом моделирования и внешней средой, анализируют потоки вещества, энергии и информации через границу из внешней среды в объект и из объекта во внешнюю среду, определив тем самым входной и выходной процессы. Исходя из теоретических представлений выдвигают гипотезы о состоянии. Расчленив объект на элементы и определив существенные связи, конструируют структуру и формулируют интегративное свойство объекта. Этот шаг носит в основном описательный характер в терминах предметной области. Полученное описание называют системной моделью объекта. При его выполнении стремятся обеспечить как можно более широкий охват свойств и характеристик объекта. На этом шаге принимают решение о степени детализации модели и определяют средства, необходимые для моделирования.

На третьем шаге исходя из цели моделирования осуществляют усечение множеств, относящихся к входному, выходному процессам и состоянию. Устанавливают количественные характеристики связей, оценивают их существенность и принимают решение о включении элементов объекта в модель. На основе теоретических представлений о состоянии конструируют операторы, связывающие входные воздействия и состояние, а также зависимости выходных процессов от состояния. Модель на этом шаге приобретает количественный характер. Такую модель в дальнейшем будем называть конструктивной.

Конструктивная модель — это такая модель, которая по количественному описанию состояния системы в момент времени t_0 и входного процесса на отрезке времени $[t_0, t]$, позволяет для любого момента времени $t \geq t_0$ получить количественную оценку текущего состояния и выходного процесса. Состояние системы в момент времени t_0 называют начальным состоянием. Обозначим его Z_0 , фрагмент входного воздействия на отрезке времени $[t_0, t]$ обозначим $P[t_0, t]$, текущее состояние — Z_t . В таком случае общий вид оператора, показывающего, как под воздействием фрагмента входного процесса $P[t_0, t]$ система из состояния Z_0 переходит в состояние Z_t , будет выглядеть следующим образом:

$$Z_t = \sigma[t, t_0, Z_0, P[t_0, t]].$$

Выходной процесс в момент времени t обозначим X_t . Обычно он просто выражается через текущее состояние

$$X_t = \eta[t, Z_t].$$

Операторы $Z_t = \sigma[t, t_0, Z_0, P[t_0, t]]$ и $X_t = \eta[t, Z_t]$ называются соответственно оператором перехода и оператором выхода. **Оператор перехода** показывает, как в результате входного воздействия система переходит из предыдущего состояния в новое состояние. **Оператор выхода** связывает текущее состояние выхода с текущим состоянием системы.

Оператор перехода в общем случае имеет весьма сложную конструкцию. Это могут быть алгоритмы решения систем дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, конечно-разностные и конечно-элементные алгоритмы, аналоговые устройства, специализированные процессоры. В математических моделях наиболее часто оператор перехода представляется определенным интегралом, вычисленным на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$. Но в любом случае оператор перехода всегда удовлетворяет трем аксиомам [2].

Аксиома согласованности. Для любых $t \in T, z \in Z$ и $p(.) \in P(.)$ выполняется равенство

$$\sigma[t, t, z, p(.)] = z.$$

Здесь множество $P(.)$ — допустимый фрагмент входного процесса, а $p(.)$ — компонент этого множества. Эту аксиому можно трактовать так: система в любой фиксированный момент времени может находиться в одном и только в одном состоянии.

Аксиома ассоциативности. Для любых $t_0 \leq t_1 \leq t_2, t_i \in T, z_0 \in Z, z_1 \in Z$ и $p(.) \in P(.)$ выполняется равенство

$$\sigma[t_2, t_0, z_0, p(.)] = \sigma[t_2, t_1, \sigma[t_1, t_0, z_0, p(.)], p(.)] = \sigma[t_2, t_1, z_1, p(.)].$$

При моделировании это понимается так: любой момент времени, для которого известно состояние, может быть выбран в качестве начального.

Аксиома причинности. Для любых $t_0 \in T, t \in T, z_0 \in Z, p(.) \in P(.)$ и $\bar{p}(.) \in P(.)$, таких, что $p(.) = \bar{p}(.)$, выполняется равенство

$$\sigma[t, t_0, z_0, p(.)] = \sigma[t, t_0, z_0, \bar{p}(.)],$$

то есть никакие входные воздействия после момента времени t не изменят состояние системы в момент t . Иначе говоря, настоящее не зависит от будущего.

Оператор выхода значительно проще. Это либо обыкновенные алгебраические выражения, либо просто компоненты состояния, определенные на границе системы с внешней средой. Примеры: сила осадки (выход) равна произведению нормального напряжения (состояние) на площадь контакта бойка с поковкой (состояние); тепловой поток от нагретой заготовки (выходной процесс) при конвективном теплообмене пропорционален температуре поверхности заготовки (состояние на границе); частота вращения вала двигателя (выход) равна частоте вращения ротора (состояние).

Таким образом, для любой системы (технической или технологической) связь между входом (входным процессом) и выходом (выходным процессом) определена тройкой $\langle \sigma, Z, \eta \rangle$. Эта тройка предложена для описания системы Р. Калманом и в литературе именуется триадой Калмана. Определив множество Z и сконструировав операторы перехода и выхода, получим конструктивную модель системы. Нетрудно заметить, что для корректного функционирования модели нужно еще назначить множество времени T и начальное состояние.

Операторы перехода и выхода необязательно должны быть математическими объектами. Это могут быть устройства, приборы, измерительные системы. Общее требование: они должны обладать количественными свойствами, их действия должны представляться в количественной форме. С этой целью в практике физического моделирования используют первичные преобразователи информации — датчики.

На четвертом шаге осуществляется испытание модели и интерпретация полученных результатов. К сожалению, подвергнуть модель реальному входному воздействию редко представляется возможным. Вместо реального входного воздействия используется его модель, то есть реальные потоки вещества, энергии и информации заменяются изображением или математическим описанием P^m (рис. 7). В ряде случаев изображение может даже иметь другую физическую природу. Например, поток жидкости в канале может быть представлен электрическим током, напряжения на контактной поверхности при осадке — формой песчаной насыпи или электрическими потенциалами на электропроводной бумаге. Входные воздействия могут быть масштабированы

к размеру модели объекта в соответствии с законами подобия. Вместо реальных непрерывных потоков могут быть использованы дискретные точечные значения. Чтобы сократить число опытов при испытаниях, прибегают к использованию методов планирования эксперимента. Все это приводит к тому, что вместо реального выходного процесса исследователь получает лишь его описание, изображение X^M (рис. 7).

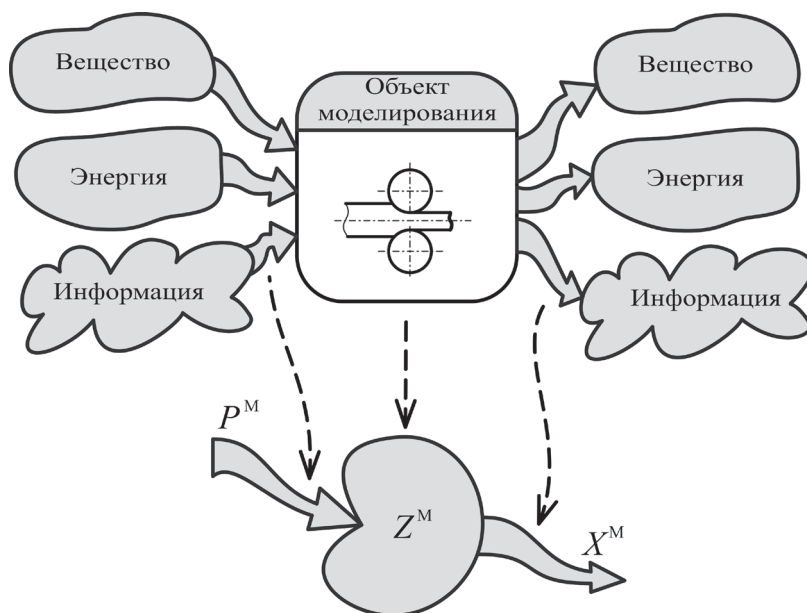


Рис. 7. Объект и модель

Для того чтобы перейти обратно к реальному объекту, потребуется интерпретировать полученные результаты, расшифровать их. Иногда это может быть достаточно легко. Например, при моделировании осадки поковки между плоскими бойками в целях определения силы можно осадить геометрически подобный образец уменьшенного размера из того же материала и при той же температуре. Полученную на образце силу осадки можно привести к реальному объекту. Не трудно грубо оценить, что сила осадки будет пропорциональна квадрату масштаба. Если размеры образца уменьшены в 10 раз по сравнению с объектом, то сила осадки реального объекта будет превышать модельную в 100 раз. На самом деле интерпретация может оказаться значительно сложнее. Дополнительно будут сказываться скорость осадки, условия теплообмена, наличие или отсутствие смазки, шероховатость бойков

и масса других факторов, которые очень трудно учесть при моделировании. Проблема интерпретации результатов моделирования является одной из самых трудных в исследовательской практике. Из одного и того же результата, полученного при моделировании, могут быть сделаны прямо противоположные выводы.

Снизить риск неверной интерпретации позволяет глубокое понимание существа моделируемого объекта и его взаимодействия с внешней средой.

2.1.2. Моделирование структуры. Графы

При моделировании структуры технических систем нашел широкое применение аппарат теории графов. Обозначим множество элементов моделируемой системы $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, множество связей между ними $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Не трудно догадаться, что каждая связь соответствует одной паре элементов, то есть множество F является подмножеством множества всех возможных пар элементов, принадлежащих M . Множество всех пар, составленных из элементов множеств M и N , называют декартовым произведением этих множеств и обозначают

$$M \times N = \{\{m_1, n_1\}, \{m_1, n_2\}, \dots, \{m_1, n_r\}, \{m_2, n_1\}, \dots, \{m_k, m_r\}\},$$

где $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$. Следовательно, $F \subset M \times M$, где $M \times M = \{\{m_1, m_1\}, \{m_1, m_2\}, \dots, \{m_1, m_k\}, \{m_2, m_1\}, \dots, \{m_k, m_k\}\}$.

В теории графов множество M называют множеством вершин, а F — множеством дуг и говорят, что множество дуг — подмножество квадрата M^2 множества вершин. Нужно заметить, что в общем случае пары $\{m_i, m_j\}$ и $\{m_j, m_i\}$ различны. При моделировании это понимают так: первая в паре вершин порождает связь (поток энергии, вещества или информации выходит из нее), вторая в паре вершина принимает связь (поток вещества, энергии или информации входит в нее), m_2 зависит от m_1 . Первая вершина — донор, вторая — акцептор. Кроме того, любой элемент может образовать пару с самим собой $\{m_i, m_i\}$. Это означает, что часть вещества, энергии или информации с выхода элемента снова направлена на его вход, образует петлю. Клеть линейного стана в прокатных цехах, автомат-стан в трубных цехах являются хорошими примерами таких элементов.

Неоднородное множество $G = \langle M, F \rangle$ называют графом. Множество вершин еще называют носителем графа, а множество дуг — его сигнатурой. При моделировании графы могут быть представлены несколькими способами: графически — плоской схемой, списком и матрицами. При графическом представлении вершины (узлы) изображают точками или кружками, а дуги — линиями. Линии завершают стрелками, если связь имеет направление. На рис. 8, *а* представлен граф со связями, не имеющими направления, на рис. 8, *б* связи имеют направление, связь f_7 образует петлю.

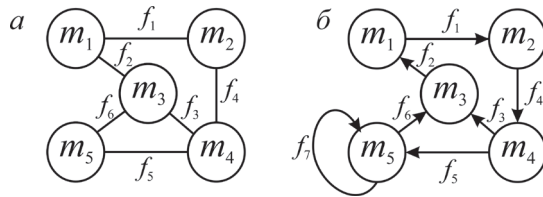


Рис. 8. Плоская схема:

а — неориентированный граф; *б* — ориентированный граф

Внешние входы объекта моделирования на схеме не показаны. Плоская схема является наглядным и удобным способом представления графа при небольшом количестве вершин и связей, но она пригодна лишь для иллюстрации. Анализ модели и интерпретация результатов при таком представлении существенно затруднены и сводятся к поиску простых субструктур — циклов и контуров, окрестностей и характеристик симметрии. Программный анализ графов, представленных плоскими схемами, на современном этапе развития информационных технологий не представляется возможным и эффективным.

Граф, для дуг которого определено направление, называют ориентированным. Неориентированным называют граф, у которого ни для какой дуги не определено направление.

При представлении графа списками каждой вершине графа сопоставляется список зависимых вершин. Так, графу на рис. 8, *а* соответствуют такие пять списков: $\{m_1: m_2, m_3\}$, $\{m_2: m_1, m_4\}$, $\{m_3: m_1, m_4, m_5\}$, $\{m_4: m_2, m_3, m_5\}$, $\{m_5: m_3, m_4\}$, а графу на рис. 8, *б* — $\{m_1: m_2\}$, $\{m_2: m_4\}$, $\{m_3: m_1\}$, $\{m_4: m_3, m_5\}$, $\{m_5: m_3, m_5\}$. Списки представляют собой весьма специфические подмножества множества вершин и в ряде случаев доступны для компьютерного анализа, поскольку современные программные средства имеют развитые возможности работы с множествами.

ми. Однако такой анализ все еще сопряжен с большими сложностями при подготовке данных и интерпретации результатов.

Наиболее приспособленным для компьютерного анализа является представление графов матрицами смежности и инцидентности.

Введем несколько новых определений. Понятие **смежности**: вершины m_i и m_j являются смежными, если вершина m_j зависит от m_i , то есть связь порождена вершиной m_i (выходит из нее) и действует на вершину m_j . Если связь не имеет направления (нейтральная связь), то из смежности вершин m_i и m_j следует смежность вершин m_j и m_i . В случае направленных связей такое возможно лишь при наличии обратной связи или контрсвязи.

Понятие **инцидентности** относится к отношениям между вершинами и связями. Связь f инцидентна вершине m , если она порождена этой вершиной, выходит из нее. Связь коинцидентна вершине m , если она входит в эту вершину. Любая нейтральная связь является одновременно и инцидентной, и коинцидентной своей вершине.

На основе этих понятий конструируются матрицы смежности и инцидентности. Матрицей смежности называют матрицу $S_{k \times k} = (s_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, k$, где k — количество вершин, а компоненты s_{ij} определены следующим образом:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если вершины } m_i \text{ и } m_j \text{ смежные;} \\ 0, & \text{если вершины } m_i \text{ и } m_j \text{ несмежные.} \end{cases}$$

Матрица смежности для неориентированного графа симметрична, все диагональные компоненты s_{ij} равны 1, поскольку вход и выход вершины не различимы. Для ориентированного графа в общем случае матрица несимметрична, а диагональный элемент s_{ij} равен 0, если у вершины m_i вход и выход не соединены (нет петли), и равен 1 в противном случае.

Матрицу смежности удобно представлять в электронных таблицах. Обычно таблицу снабжают заголовками. Матрица смежности в табличной форме для неориентированного графа, представленного плоской схемой (рис. 8, а), приведена ниже:

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
m_1	1	1	1	0	0
m_2	1	1	0	1	0
m_3	1	0	1	1	1
m_4	0	1	1	1	1
m_5	0	0	1	1	1

При представлении в табличном виде матрицы смежности для ориентированного графа заголовки слева относятся к вершинам-донорам — источникам связи, верхний заголовок соответствует вершинам-акцепторам — приемникам связи. Ясно, что такая градация не имеет смысла для неориентированного графа. Далее представлена матрица смежности для графа на рис. 8, б. Она несимметрична и диагональный компонент равен 1 только для вершины m_5 :

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
m_1	0	1	0	0	0
m_2	0	0	0	1	0
m_3	1	0	0	0	0
m_4	0	0	1	0	1
m_5	0	0	1	0	1

Единица на пересечении строки m_1 и столбца m_2 означает, что связь (поток вещества, энергии или информации) выходит из элемента m_1 и приходит к элементу m_2 , а единица на пересечении строки m_5 и столбца m_5 говорит о том, что такой поток выходит из элемента m_5 и снова возвращается на его вход.

Матрицей инцидентности называют прямоугольную матрицу, представляемую в виде $A_{k \times r} = (a_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, r$, где k — количество вершин; r — количество связей. Компоненты матрицы определены следующим образом:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если связь } j \text{ инцидентна вершине } i; \\ -1, & \text{если связь } j \text{ коинцидентна вершине } i; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

В такой форме могут быть представлены только графы, не содержащие нейтральных связей и петель. Нетрудно заметить, что ни для графа на рис. 8, а, ни для графа на рис. 8, б матрица инцидентности не определена, поскольку некоторые компоненты этой матрицы должны одновременно приобретать значения «1» и «-1».

Корректным способом является представление инцидентности в расщепленной форме матрицами $A_{k \times r}^+$ и $A_{k \times r}^-$ с компонентами:

$$a_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & \text{если связь } j \text{ инцидентна вершине } i; \\ 0 & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$a_{ij}^- = \begin{cases} 1, & \text{если связь } j \text{ коинцидентна вершине } i; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Все компоненты матриц $A_{k \times r}^+$ и $A_{k \times r}^-$ неотрицательны и определены вне зависимости от наличия петель и нейтральных связей. Ниже представлены матрица $A_{k \times r}^+$ и матрица $A_{k \times r}^-$ для графа на рис. 8, б. Между матрицами смежности и инцидентности существует важная связь: для графа без петель и нейтральных связей $S_{k \times k} = A_{k \times r}^+ \cdot (A_{k \times r}^-)^T$. При наличии нейтральных связей диагональные элементы матрицы смежности s_{ii} , вычисленные по этой формуле, приобретают значение, равное количеству связей элемента i .

Матрица инцидентности $A_{k \times r}^+$ для графа на рис. 8, б:

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
m_1	1	0	0	0	0	0	0
m_2	0	0	0	1	0	0	0
m_3	0	1	0	0	0	0	0
m_4	0	0	1	0	1	0	0
m_5	0	0	0	0	0	1	1

Матрица коинцидентности $A_{k \times r}^-$ для графа на рис. 8, б:

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
m_1	0	1	0	0	0	0	0
m_2	1	0	0	0	0	0	0
m_3	0	0	1	0	0	1	0
m_4	0	0	0	1	0	0	0
m_5	0	0	0	0	1	0	1

Матричное представление дает возможность найти количественные значения ряда важных характеристик графа. По матрице смежности определяют влияние и могущественность вершин графа.

Свойство «*влиятельность*» F_i^0 количественно показывает, какие элементы и сколько их зависит от элемента i и может быть посчитано суммированием по i -й строке матрицы смежности

$$F_i^0 = \sum_{j=1, j \neq i}^k s_{ij},$$

где k — количество вершин.

В надежной с эксплуатационной точки зрения системе значения F_i^0 , посчитанные для всех вершин m , не должны сильно отличаться друг от друга. В противном случае имеем узкое место в технологии: если оно выйдет из строя, сломается вся система управления. В технических и технологических системах самая влиятельная вершина определяет узкое место. В машине такие узлы и детали будут быстрее выходить из строя, в технологии — будут приводить к заторам и простоям. Уменьшение влиятельности достигается за счет дублирования влиятельных элементов или перераспределения потоков.

Могущественность количественно характеризуется величиной F_i^r , $r > 0$, и находится с помощью итераций:

$$F_i^r = \sum_{j=1, j \neq i}^k F_j^{r-1} \cdot s_{ij}.$$

В первой итерации используется значение влиятельности F_i^0 . Количество итераций не должно превышать $k - 1$. Часто могущественность вершины количественно характеризуют ее рангом. Для этого все вершины ранжируют в порядке убывания величины F_i^r . Вершина с максимальным значением F_i^r получает самый высокий ранг «1», с минимальным значением — низший ранг. Вершины с одинаковыми значениями F_i^r имеют одинаковые ранги. Чем выше ранг, тем могущественнее вершина.

В процессе итераций ранги вершин могут меняться. В теории графов имеется *теорема*, доказательство которой мы здесь не приводим: если все ранги вершин не изменились в двух последовательных итерациях могущественности, то они не изменятся и при последующих итерациях.

Таким образом, если в двух последовательно выполненных итерациях ранги не изменились, то итерации можно прекратить. Это позволяет значительно ускорить процесс оценки могущественности вершин, что очень существенно при большом количестве вершин (графы при моделировании реальных структур могут насчитывать десятки тысяч вершин). Говорят, что *могущественность вершины показывает, насколько влиятельны вершины, зависящие от данной*. Могущественность, в отличие от влиятельности, не свидетельствует об узком месте, а наоборот, определяет наиболее важный элемент (узел, деталь, операцию, участок). Обеспечение условия «наибольшего благоприятствования» для этого элемен-

та способствует улучшению функционирования системы в целом. Например, при анализе работы одного из волочильных цехов обнаружили, что наибольшей могущественностью обладает не основной участок цеха, а участок, отвечающий за подготовку и хранение инструмента. Улучшение контроля над этим участком привело к уменьшению простоев, повышению качества продукции и сокращению затрат на производство.

Анализ моделей структур с использованием матриц инцидентности позволяет выявить выходы и входы системы — тупиковые (рис. 9, а) и висячие (рис. 9, б) вершины, выделить повторяющиеся цепи (циклы и контуры) в сложных многозвенных объектах.

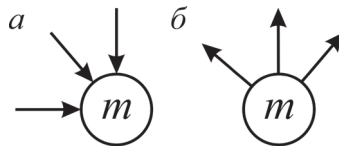


Рис. 9. Входы (а) и выходы (б)

Мы рассмотрели простой случай представления графов, в котором учитывается только отсутствие (0) или наличие (1) связи. В реальных объектах одна связь может быть очень сильной, другая — достаточно слабой, но на графе, а следовательно, и в матрицах они будут представлены одинаково. Понятно, что оценка влиятельности и могущественности в этом случае не будет отражать реальное состояние моделируемого объекта. Чтобы учесть различия в важности связей, каждой дуге графа сопоставляют *вес*. Граф, для всех дуг которого указан вес, называют **взвешенным**. В матрицах смежности и инцидентности вместо единиц тоже указывают вес. В качестве веса может быть использована любая количественная *неотрицательная* оценка силы или мощности связи, однако принято выбирать безразмерные приведенные к отрезку $[0, 1]$ характеристики. Например, в качестве веса корреляционной связи выбирают абсолютную величину коэффициента парной корреляции. Безразмерная приведенная к отрезку $[0, 1]$ величина $\hat{f}_i, i = 1, 2, \dots, r$, для оценки силы или мощности связи также может быть назначена в качестве веса.

Задав матрицу весов $P_{r \times r} = (p_{ij}), p_{ii} = f_i; p_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, r$, можно представить взвешенный граф следующей матрицей смежности: $\tilde{S}_{k \times k} = A_{k \times r}^+ \times P_{r \times r} \times (A_{k \times r}^-)^T$. Матрицу $\tilde{S}_{k \times k}$ называют взвешенной матрицей смежности.

2.2. Системы управления технологическими процессами

В металлургии для управления технологическими процессами используется большой спектр автоматических и автоматизированных систем.

2.2.1. Классификация систем

По назначению можно в порядке возрастания сложности можно выделить различные группы.

Системы защиты предназначены для защиты оборудования, персонала и окружающей среды при нештатном протекании процесса, угрожающем аварией с тяжелыми последствиями. Это могут быть устройства, обеспечивающие автоматическое отключение рабочей машины или ее узла, отключение притока расходного материала (газ, жидкость, металл) или автоматическое перекрытие аварийной зоны. После срабатывания защиты необходимо осуществить устранение причины нештатной ситуации и выполнить запуск системы. Устройства защиты могут быть достаточно простыми. Самый простой способ защиты — использование разрушаемых элементов. Например, это плавкие предохранители в электрической цепи, механически разрушаемые элементы в кинематических цепях (пальцы муфт, срезные кольца в нажимных механизмах, мембраны в системах высокого давления). Такие элементы предохраняют от механической перегрузки, короткого замыкания в электрической цепи, броска давления газа или жидкости.

В сложных случаях применяют более «интеллектуальные» устройства — токовые реле, автоматы защиты, тепловые реле, механизмы, использующие расходный ресурс. Такие устройства срабатывают при критическом накоплении опасного воздействия. Их назначение — предотвращение аварий при продолжительном отклонении параметров от номинального значения, например, когда такое отклонение ведет к перегреву двигателя или подводящих проводов, утечке вредного или опасного вещества из системы, усталости или износу жизненно важных деталей конструкции.

Системы блокировки применяют для согласования работы связанных механизмов и для временной приостановки выполнения текущей операции при возникновении устранимой нештатной ситуации, не угрожающей серьезной аварией. Так блокируется, например, подача очередной заготовки, пока не завершена обработка предыдущей, или приостанавливается движение исполнительного органа, если в зоне движения оказалась рука оператора. После устранения нештатной ситуации выполнение операции возобновляется без участия человека.

Системы блокировки могут быть тоже достаточно простыми. Например, при открывании крышки блока, который содержит элементы, находящиеся под опасным напряжением, отключают питание блока. Для этого достаточно, чтобы питание поступало через перемычку, жестко закрепленную на крышке. Существуют и значительно более сложные блокирующие устройства. Они могут быть выполнены с использованием программируемых логических контроллеров, электро-механических командоаппаратов, логических электронных схем. Такие системы блокировки способны анализировать множество нештатных ситуаций различного происхождения и адекватно реагировать при их возникновении.

Системы пуска и остановки обеспечивают начало и завершение работы автоматического или автоматизированного устройства. Основной задачей таких систем является обеспечение плавного безударного перехода из одного состояния в другое. В не электрических цепях плавность пуска и останова обеспечивается временным включением демпфирующих устройств, элементов с переменным сопротивлением потоку жидкостей или газов. Например, обычный вентиль в гидравлической системе, в отличие от клапана, обеспечивает управление потоком жидкости без гидравлических ударов.

Системы автоматической регистрации используются для автоматической регистрации параметров технологического процесса и текущего состояния оборудования. Распространение этих систем в цехах обработки металлов давлением весьма широко и имеет огромные перспективы. Если два десятка лет назад они использовались главным образом для контроля за режимами термообработки, расходом электроэнергии, газа и воды, то в современных цехах регистрируются почти все параметры, которые могут оказать влияние на качество готовой продукции и экономические показатели. Ведется учет расходных материалов и металла, регистрируются условия выполнения технологи-

ческих операций — температуры, давления, скорости, коэффициенты деформации. Регистрируется время и исполнитель технологической операции, результаты промежуточного контроля, расход инструмента и смазки. Все это стало возможным благодаря применению цифровых систем и интегрированных средств контроля. Результаты, как правило, представляются в виде файлов стандартизованных форматов и хранятся на специальных носителях. Тем не менее во многих случаях еще находят применение самопишущие приборы контроля, выдающие информацию на бумажный носитель. Заверенный соответствующим образом, этот материал может служить юридическим документом при расследовании несчастных случаев и катастроф.

Системы автоматического регулирования (САР) являются важнейшей составной частью автоматического и автоматизированного оборудования, применяемого в цехах ОМД. Основная функция этих систем — поддержание значения контролируемого параметра в заданном диапазоне при наличии возмущений. В частности, САР обеспечивают удержание заданных частоты вращения приводов рабочих машин при изменении нагрузки, температуры нагрева металла, давления в гидравлических и пневматических системах, концентрации травильных растворов, наконец, уровня освещенности в цехе и еще многое другое. В зависимости от принципа работы, особенностей устройства, правил выработки управляющих воздействий и области применения, САР дробятся на множество классов. Подробно классификация САР и их работа будут рассмотрены в гл. 4.

Системы автоматического управления (САУ) интегрируют в себе практически все предыдущие системы. Они могут включать системы пуска и останова, блокировки и защиты, регистрации и автоматического регулирования. Функция САУ — изменение контролируемого параметра (параметров) по заданному закону и (или) обеспечение заданной последовательности действий, движений. Таким образом, если в процессе работы прокатного стана нужно, например, поддерживать заданную величину натяжения, то достаточно для этой цели простой САР. Если же в процессе прокатки нужно автоматически изменять частоту и направление вращения валков, то без системы автоматического управления уже не обойтись.

Современное состояние автоматизации процессов обработки металлов давлением характеризуется широким применением *автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП)*.

АСУ ТП — это автоматизированная система для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятым критерием качества управления, то есть в АСУ ТП предполагается наличие оптимизации управляющих воздействий. В этом заключается основное отличие САУ и АСУ ТП. Кроме того, как ясно из названия, использование АСУ ТП предполагает включение в систему человека. Во многих случаях в качестве критерия качества управления рассматриваются экономические показатели. Поэтому наиболее подробно АСУ ТП изучаются в экономических дисциплинах. АСУ ТП может содержать в себе все вышеперечисленные системы и органически включаться в системы следующего уровня иерархии, объединяемые общим названием АСУ (автоматизированная система управления). АСУ предполагает наличие организационных структур, схем принятия технических и организационных решений и наличия лица, принимающего решения. Для создания и анализа АСУ необходим учет психологических и личностных факторов, поэтому АСУ не может рассматриваться лишь в техническом аспекте.

По принципу действия различают системы непрерывного и дискретного действия. В системах *непрерывного действия* управляющие воздействия определены для всех точек множества времени $T = \{t: t_\alpha \leq t \leq t_\beta\}$. Здесь t_α — момент начала процесса управления — момент завершения процесса. Например, для удержания в заданном диапазоне толщины полосы при прокатке необходимо непрерывно измерять ее на выходе из валков и соответственно изменять с помощью нажимного устройства расстояние между валками. Система во время работы машины находится в активном состоянии: непрерывно отслеживает изменения толщины полосы и вырабатывает управляющее воздействие, изменяющее зазор между валками.

В системах *дискретного действия* определены управляющие воздействия лишь отдельных точек множества времени $T = \{t: t \in \{t_1, t_2, \dots, t_k\}\}$. Кстати, последнее не относится к измерению контролируемого параметра. Как правило, контролируемый параметр отслеживается непрерывно, а управляющие воздействия вырабатываются по необходимости. Например, в обыкновенном электрическом утюге, знакомом всем хозяевам, нагрев включается, если температура его поверхности ниже необходимой, и выключается при достижении заданной температуры.

По представлению информации различают аналоговые и цифровые системы автоматики. В *аналоговых* системах информация о кон-

тролируемых параметрах и управляющих воздействиях представлена непрерывными (аналоговыми) сигналами, в *цифровых* — дискретными знаковыми (цифровыми) сигналами. Подробнее основные различия между аналоговыми и цифровыми сигналами будут рассмотрены при анализе сигналов в каналах связи информационных систем.

2.2.2. Общая структурная схема системы контроля и управления

Принято рассматривать два варианта схем систем контроля и управления: структурные схемы и функциональные схемы. В предыдущей главе было дано определение структуры. Схему, в которой представлена структура системы, мы будем называть *структурной* схемой. Эта схема отображает элементы системы и связи между ними, а также их взаимное расположение в пространстве и времени. При этом абстрагируются от свойств, физической природы элементов и выполняемых ими функций. При представлении *функциональных* схем основное внимание обращено на функции, выполняемые элементами системы. Функциональные схемы будут рассмотрены в гл. 4 на примерах САУ. Здесь же мы рассмотрим общую структурную схему, ее основные элементы и связи между ними (рис. 10).

В наиболее общем случае система контроля и управления (АСУ ТП, САУ) содержит восемь подсистем: объект управления, подсистему измерения, подсистему оценки состояния, подсистему управления, а также подсистему настройки управления, подсистему настройки оценки состояния, подсистему идентификации и подсистему оптимизации.

Потоки вещества, энергии и информации, определяющие обмен системы с внешней средой, на рис. 10 обозначены красными стрелками. Объект управления получает в общем случае из внешней среды вещество, энергию и информацию (B , \mathcal{E} , I) и отдает преобразованные вещество, энергию и информацию (B' , \mathcal{E}' , I') обратно во внешнюю среду. Кроме того, из внешней среды на систему воздействуют случайные изменяющиеся во времени и не несущие полезной информации сигналы $\eta(t)$ — помехи. Помехи могут опасно воздействовать на систему, искажая результаты измерений, оценки и команды, отдаваемые подсистемой управления. Помехи порождаются либо техногенными, либо природными причинами.

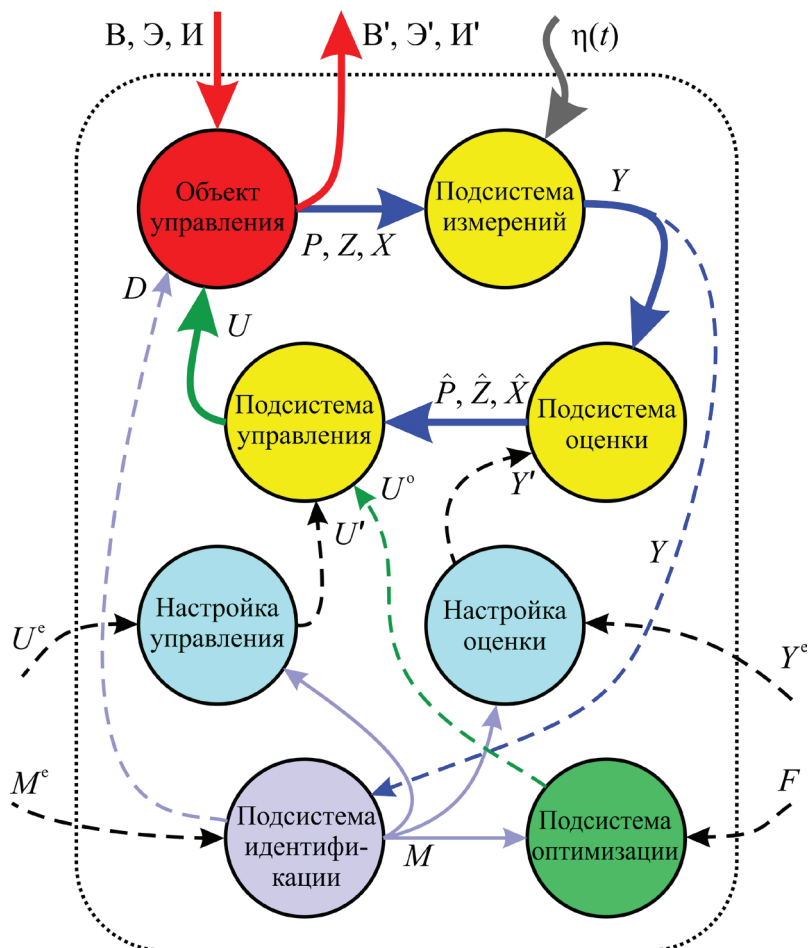


Рис. 10. Общая структурная схема системы контроля и управления

Перечисленные подсистемы обмениваются сигналами, содержащими необходимую для функционирования системы информацию. Потоки информации, циркулирующие между подсистемами, на рисунке показаны цветными линиями. Эти потоки образуют информационные связи.

Сплошной зеленой линией показан поток команд U — прямое воздействие на объект управления. Реакция объекта управления на управляющее воздействие (показана сплошными синими линиями) контролируется подсистемами измерения и оценки состояния, составляющими главную обратную связь (ГОС). Главная обратная связь всегда присутствует в любой автоматической системе контроля

и управления. Она может быть неявно выраженной, реализованной через внешнюю среду или даже быть разорванной во времени (программное управление). Однако при ее отсутствии никакое автоматическое управление невозможно. В автоматизированных системах элементом главной обратной связи может являться человек — оператор. В этом случае информационные связи приобретают стохастический характер.

Информационное наполнение ГОС определяется функциями подсистем:

- информацией о входах (множество P), состоянии (множество Z) и выходах (множество X) объекта управления;
- измерениями, загрязненными помехами (множество Y);
- оценкой входного процесса (множество P), состояния (множество Z) и выходного процесса (множество X);
- управляющими воздействиями — командами (множество U).

Пояснить работу ГОС можно следующим образом. *Объект управления* является основным элементом, определяющим информационное наполнение ГОС. Он должен быть снабжен устройствами, распознающими и выполняющими команды подсистемы управления. Потоки вещества, энергии и информации через объект управления должны быть доступны для измерения в любой момент времени. Таким образом, объект управления в момент времени t содержит всю ин-

формацию о входном процессе $P = \begin{pmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ \dots \\ p_k(t) \end{pmatrix}$, о состоянии $Z = \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \dots \\ z_n(t) \end{pmatrix}$

и выходном процессе $X = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_m(t) \end{pmatrix}$. Величину k называют размерностью

входного процесса; n — размерностью объекта управления; m — размерностью выходного процесса. Из-за физических ограничений в системах контроля и управления обычно доступна не вся информация, а лишь небольшая ее часть.

Подсистема измерений получает информацию через первичные преобразователи лишь о наиболее существенных характеристиках входов

и выходов объекта управления. О состоянии самого объекта получить информацию можно лишь косвенно — через его входы и выходы.

Информация, полученная подсистемой измерений, дополнительно искажена помехами и обычно представлена вектором измерений

$$Y = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_l(t) \end{pmatrix}. \text{ Понятно, что размерность } l \text{ этого вектора существенно}$$

меньше общей размерности входного процесса, состояния и выходного процесса.

Подсистема оценки состояния, анализируя измерения Y с использованием алгоритмов фильтрации и обработки информации, получает оценки входного процесса P , состояния Z и выходного процесса X :

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} \hat{p}_1(t) \\ \hat{p}_2(t) \\ \dots \\ \hat{p}_k(t) \end{pmatrix}, \quad \hat{Z} = \begin{pmatrix} \hat{z}_1(t) \\ \hat{z}_2(t) \\ \dots \\ \hat{z}_n(t) \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \hat{X} = \begin{pmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \dots \\ \hat{x}_m(t) \end{pmatrix}.$$

Подсистема оценки состояния для получения оценок использует дополнительную информацию. В частности, это заданные значения контролируемых параметров — «уставки». Кроме того, это формулы и таблицы, позволяющие перейти от измерений к оценкам реального значения параметра, например, от сигнала термопары в милливольтках перейти к температуре в градусах Цельсия или по току в диагонали моста мездозы (в миллиамперах) оценить силу, действующую на валок (в единицах силы). Вся совокупность дополнительных данных для оценки состояния на рис. 10 представлена вектором Y' размерности r

$$Y' = \begin{pmatrix} y'_1(t) \\ y'_2(t) \\ \dots \\ y'_r(t) \end{pmatrix}.$$

Эти данные либо напрямую устанавливаются из внешней среды при настройке системы, либо вырабатываются *подсистемой настройки оценки состояния* на основе данных для настройки. Как правило,

при настройке системы используется тот и другой метод одновременно. Часть данных — тарифовочные таблицы, коэффициенты преобразования размерностей, допуски на значения параметров — задают на прямую. Требуемые значения параметров задают в виде, удобном для оператора. Например, целесообразно задавать требуемое значение частоты вращения в оборотах в минуту, а не в радианах или напряжениях тахометра, соответствующих выбранной частоте.

Вся совокупность данных из внешней среды для настройки системы на рис. 10 представлена вектором Y^e ,

$$Y^e = \begin{pmatrix} y_1^e(t) \\ y_2^e(t) \\ \dots \\ y_r^e(t) \end{pmatrix}.$$

В старых системах автоматического регулирования часто использовалась простейшая оценка состояния — величина отклонения измеренного значения контролируемого параметра от заданного его значения. Например, с помощью тахометра в момент времени t измерена частота вращения двигателя $x_1(t)$ и получен сигнал от измерительной подсистемы $y_1(t)$. На вход подсистемы настройки состояния подано значение требуемой в этот момент времени частоты вращения двигателя $y_1^e(t)$. Последнее подсистемой настройки состояния преобразуется в напряжение $y_1'(t)$. Оценкой состояния в таком случае будет разность $\hat{x}_1(t) = y_1'(t) - y_1(t)$. Эта разность положительна, если частота вращения меньше заданной, и подсистема управления должна выработать команду на ускорение, например, увеличить ток в обмотке двигателя. В противном случае должна быть выдана команда на замедление. Нетрудно догадаться, что реализация такой системы достаточно проста. В качестве подсистемы настройки может быть использован обычный переменный резистор, включенный по потенциометрической схеме и проградуированный в оборотах в минуту. Разность напряжений резистора-потенциометра и датчика-тахометра даст оценку частоты вращения.

Оценки состояния подают на вход *подсистемы управления*. По этим оценкам подсистема управления корректирует управляющие воздействия — команды

$$U = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_p(t) \end{pmatrix}$$

в соответствии с результатами оценки состояния. Размерность вектора управлений p , как правило, не велика и определяется возможностями объекта управления. Для двигателей это, например, управление током и магнитным потоком в обмотке возбуждения. Больше размерность управлений, например, в секционной нагревательной печи, где управляющие воздействия должны быть определены для каждой секции.

Подсистема управления иногда может быть очень простым устройством. Для рассмотренного выше примера достаточно использовать простой усилитель, который будет увеличивать ток через обмотку при положительной оценке, уменьшать — при отрицательной и поддерживать номинальный ток при номинальной частоте вращения, когда отклонение равно нулю. В подсистему управления могут быть поданы сигналы для настройки управляющих воздействий U'

$$U' = \begin{pmatrix} u'_1(t) \\ u'_2(t) \\ \dots \\ u'_p(t) \end{pmatrix}.$$

Например, это предельные величины тока, коэффициенты усиления, характеризующие инерционность объекта управления, постоянные и другие параметры, переменные. Такие сигналы вырабатываются *подсистемой настройки управления* на основе входной информации

$$U^e = \begin{pmatrix} u_1^e(t) \\ u_2^e(t) \\ \dots \\ u_p^e(t) \end{pmatrix}. \text{ Информация } U^e \text{ обычно бывает представлена в удобной}$$

для восприятия форме — в виде проградуированных шкал, визуального графического или текстового представления на мониторе, кнопок, верньеров с надписями и тому подобного.

Четыре подсистемы: подсистема настройки управления, подсистема настройки оценки состояния, подсистема идентификации и подсистема

ма оптимизации — не входят в главную обратную связь и не являются необходимыми для автоматической работы. В случае их отсутствия в системе контроля и управления параметры настройки, изображенные на рис. 10 черными пунктирными линиями, подаются в подсистемы оценки состояния и управления, минуя подсистемы настройки, то есть $U' = U^e$; $Y' = Y^e$. Однако современные автоматические системы контроля и управления обычно включают все подсистемы, приведенные на рисунке.

Рассмотрим их назначение и информационные потоки через эти подсистемы. Назначение подсистемы настройки управления и подсистемы настройки оценки состояния ясно из предыдущего. Данные подсистемы преобразуют к машинной форме и представляют в форме входных параметров, удобной для наладчика системы. Если такие подсистемы отсутствуют, то настройщик сам должен обеспечить преобразование, то есть он, например, должен помнить, сколько оборотов отвертки приведет к изменению частоты вращения на один оборот в минуту.

Особо стоят подсистемы идентификации и оптимизации. До недавних пор эти подсистемы использовались редко и случаи их применения рассматривались как высочайшие достижения автоматизации, а системы, их включающие, получали собственные имена, например, «система адаптивного управления горячей прокаткой труб на стане 30-102». В настоящее время данные подсистемы являются обязательными.

В процессе эксплуатации изменяются характеристики оборудования, заготовки, инструмента. В результате идеально подобранные настройки становятся неидеальными и требуют корректировки. Коррекцию настроек можно производить автоматически, если в подсистемах настройки заложить модель процесса M , изменяющуюся в реальном времени. Такое изменение модели обеспечивают *подсистемы идентификации*. На входе этой подсистемы формируется обобщенная модель процесса M^e в виде систем алгебраических или дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Сначала коэффициенты модели определены для номинального состояния процесса и оборудования. На основе такой модели конструируются алгоритмы настройки режимов автоматической работы системы. По мере эксплуатации системы ее параметры уходят от тех значений, для которых были заданы коэффициенты модели. Определение поправок для значений коэффициентов осуществляется подсистемой идентификации в процес-

се работы системы путем подачи идентифицирующих воздействий D на объект управления и анализа результатов измерений. Идентифицирующие воздействия — это слабые сигналы импульсного или синусоидального характера, не мешающие основным управляющим воздействиям. Благодаря тому, что характеристики идентифицирующих сигналов известны, по модели можно рассчитать, каким должен быть сигнал на выходе подсистемы измерений. Расхождение рассчитанного и измеренного значений свидетельствует об изменении объекта, не отраженном в модели. Корректируя коэффициенты модели, подсистема идентификации добивается близости (с заданной точностью) расчетных и измеренных результатов. Таким образом, в процессе работы системы модель M непрерывно корректируется, адаптируясь к изменяющимся условиям. Такие системы часто называют адаптивными системами управления.

Имея модель объекта управления, можно решить задачу оптимального управления. Для этого, как известно, нужна оптимизационная модель. Чтобы модель M стала оптимизационной, ее нужно дополнить целевой функцией F . Последнюю задают извне при настройке системы. В качестве цели может быть выбрано уменьшение энергозатрат, повышение быстродействия или устойчивости процесса. На основе модели M и целевой функции F подсистема оптимизации находит та-

кой вектор управляющих воздействий $U^o = \begin{pmatrix} u_1^o(t) \\ u_2^o(t) \\ \dots \\ u_p^o(t) \end{pmatrix}$, при котором целе-

вая функция имеет наилучшее значение. Найденный вектор соответствует условиям, которые могут измениться за время расчета. Поэтому требования к быстродействию подсистемы оптимизации весьма высоки. В связи с этим непосредственно использовать оптимальные управления подсистема управления не должна. Обычно в алгоритм управления закладывают требование близости оптимального набора управляющих воздействий U^o и U , реализуемых подсистемой управления на основе оценки состояния, $\|U^o - U\| \rightarrow \min$.

Как видно из структурной схемы системы контроля и управления (см. рис. 10), все элементы, может быть, кроме самого объекта управления, получают, обрабатывают и выдают информацию в весьма специфичных формах.

Таким образом, можно утверждать, что любая система контроля и управления есть не что иное, как информационная система, в которой осуществляется сбор, обработка и передача информации, представленной в виде электрических, механических, оптических и других сигналов и состояний.

При моделировании систем контроля и управления наряду со структурными схемами часто используют функциональные схемы. На функциональной схеме, как следует из названия, отображаются функции, выполняемые элементами в последовательности их выполнения. Почти все элементы функциональной схемы имеют один вход и один выход. Исключение составляет элемент, называемый сумматором, который может иметь два и более входов.

3.

Информация в системах контроля и управления

3.1. Первичные преобразователи информации — датчики (сенсоры)

Датчик — это устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины, выдает эквивалентный сигнал, являющийся функцией измеряемой величины. Под сигналом мы будем понимать поток энергии или изменение состояния физического объекта — носителя сигнала [3]. Наиболее распространенными являются электрические и электромагнитные сигналы, однако существуют оптические, акустические, пневматические, гидравлические и механические сигналы. Если m — измеряемая физическая величина, то сигнал s можно представить в виде $s = f(m)$. Функцию f называют характеристикой преобразования и представляют в виде графиков или таблиц, называемых градуировочными или тарировочными. Обычно стремятся, чтобы между малыми приращениями измеряемой величины и сигнала существовала линейная зависимость $\Delta s = S \Delta m$ (линеаризация). Коэффициент S называют «чувствительностью» датчика. Качество датчика оценивается по постоянству чувствительности в диапазоне изменения измеряемой величины. На чувствительность могут влиять условия работы датчика, характеризующие не измеряемый объект, а его окружение. Эти влияния, искажающие информацию в сигнале, называют помехами. (Следует отличать от «помех» в оптимизационной модели.) Датчик может генерировать сигнал — выдавать потенциал, ток, перемещение, излучение и тому подобное (термопара — ЭДС, пьезодатчик — заряд, рамка в магнитном поле — переменный

ток, сильфон — перемещение). Такие датчики называют активными.

Физические эффекты в активных датчиках:

- термоэлектрический эффект — разность температур — ЭДС (рис. 11, *а*);
- пьезоэлектрический эффект — деформация (сжатие, изгиб) — заряд (рис. 11, *б*);
- электромагнитная индукция — скорость — напряжение (рис. 11, *в*);
- эффект Холла — поворот, перемещение — напряжение (рис. 11, *г*);
- пирозлектрический эффект — излучение — заряд;
- внутренний фотоэффект — свет — напряжение.

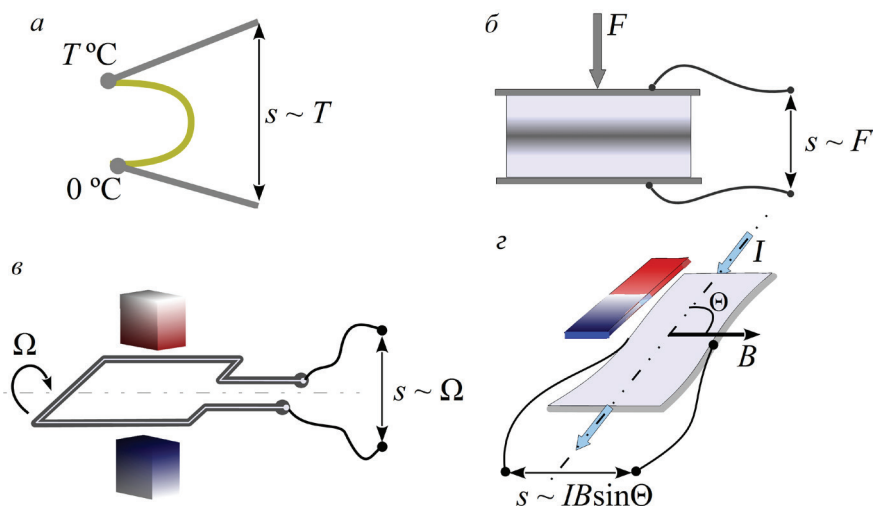


Рис. 11. Физические эффекты в активных датчиках:

а — термоэлектрический; *б* — пьезоэлектрический;

в — электромагнитной индукции; *г* — Холла

Другие датчики изменяют свое состояние, свойства в зависимости от измеряемой величины (тензодатчик: деформация — изменение сопротивления, терморезистор: температура — сопротивление, биметаллическая пластина: температура — деформация, рамка в магнитном поле: ток — поворот). Для того чтобы получить сигнал от такого датчика, нужно его «опросить», подав, например, напряжение, тогда для резистивных датчиков сигналом будет значение величины тока, для биметаллической пластины — наличие (замкнут контакт) или отсутствие тока (разомкнут контакт). К рамке можно приклеить зеркальце и осветить лучом света — сигналом будет перемещение «зайчика».

Такие датчики, сигнал с которых получают путем «опроса», называют пассивными.

Эффекты, используемые в пассивных датчиках:

- расширение при нагреве — температура — перемещение;
- изменение сопротивления при деформации проводника — тензодатчик (рис. 12, *а*);
- изменение сопротивления вещества в зависимости от температуры — термосопротивление (рис. 12, *б*);
- изменение емкости конденсатора при изменении положения обкладок — емкостной датчик (рис. 12, *в, г*);
- изменение магнитного сопротивления в зависимости от величины зазора в магнитопроводе — индуктивный датчик (рис. 12, *д*);
- изменение сопротивления току от освещенности — фотосопротивление;
- изменение проводимости в зависимости от влажности пористого материала — датчик влажности.

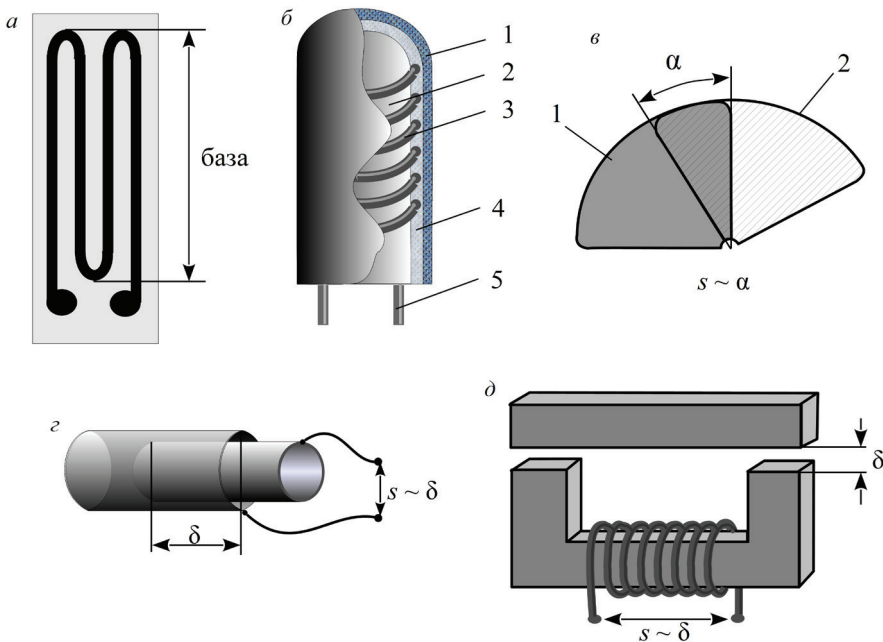


Рис. 12. Примеры пассивных датчиков:

а — тензодатчик; *б* — термосопротивление (1 — каркас; 2 — изолятор; 3 — платиновая проволока; 4 — керамика; 5 — выводы); *в* — емкостный датчик угла поворота (1 — неподвижный сектор; 2 — поворотный сектор); *г* — емкостный датчик перемещения; *д* — индуктивный датчик

Конструкция датчиков определяется в соответствии с требованиями эксплуатации. Они могут выполняться в пылевлагозащищенном исполнении, иметь противоударное крепление, снабжаться специализированными интерфейсами. Датчики, используемые в системах контроля и управления, очень разнообразны. Во многих случаях конструкция измерительного устройства системы контроля и управления представляет собой сложное изделие, включающее датчики, усилители и преобразователи, соединенные в специальную схему. Так, для измерения сил и моментов используют месдозы, которые состоят из упругого элемента с наклеенными или нанесенными другим способом тензометрическими датчиками, соединенными в мостовую схему, (рис. 13).

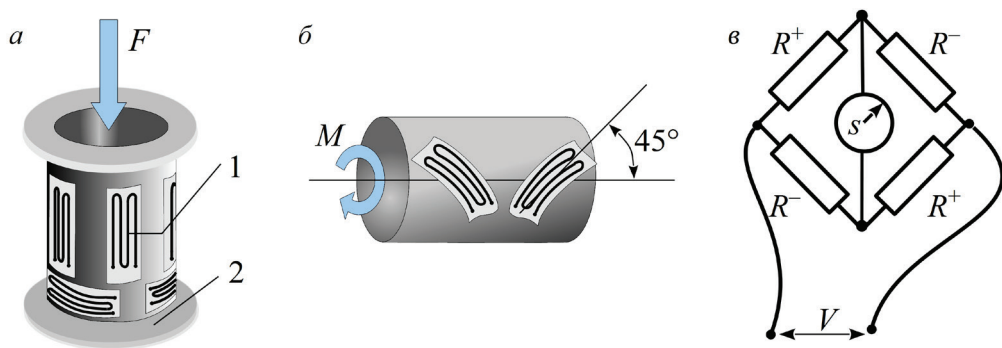


Рис. 13. Месдозы для измерения силы и момента:

a — измерение силы: 1 — тензодатчик; 2 — упругий элемент;
б — измерение момента; *в* — мостовая схема

Развитие технологии интегральных схем привело к появлению конструкций датчиков принципиально нового типа, сочетающих первичное преобразование информации с предварительной обработкой полученного сигнала. Предварительная обработка сигнала может включать фильтрацию и усиление, интегрирование и дифференцирование сигналов, получение усредненных значений, а также дискретизацию и преобразование аналоговых сигналов в цифровые. На рис. 14 и 15 приведены конструкции датчиков, исполненных по технологии интегральных схем и снабженных элементами для предварительной обработки сигнала.

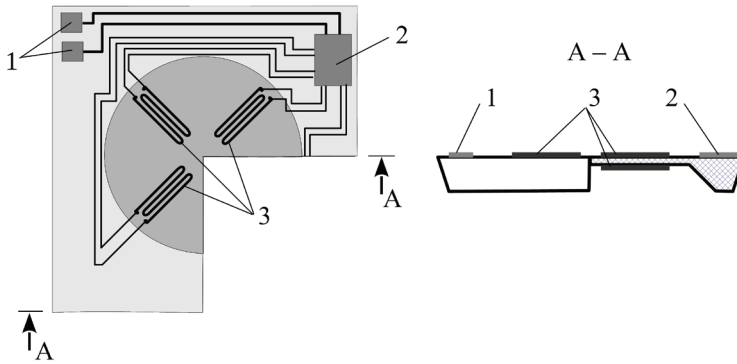


Рис. 14. Мембранный датчик давления:

1 — контактные площадки; 2 — усилитель; 3 — тензорезисторы

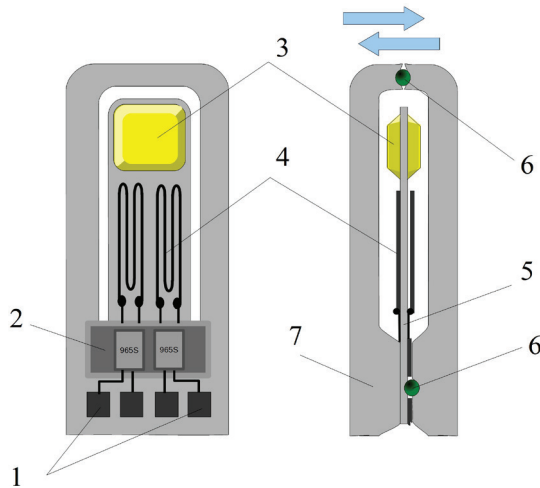


Рис. 15. Интегральный акселерометр:

1 — контактные площадки; 2 — преобразователь; 3 — инерционная масса;
4 — тензорезисторы; 5 — балка; 6 — уплотнения; 7 — корпус

Широкое распространение цифровых систем контроля и управления привело к возникновению потребности в первичных преобразователях, обеспечивающих непосредственное получение сигнала в цифровой форме. Это можно осуществить двояко: путем изменения конструкции датчика или снабжения датчика совмещенным преобразователем аналогового сигнала в цифровой код. Идея устройств, непосредственно генерирующих дискретный цифровой сигнал, достаточно проста [4]. Имеется генератор кода и считыватель. В качестве генератора может быть использован перфорированный подвижный эле-

мент — линейка (рис. 16, а, б) или диск (рис. 16, в), а в качестве считывателя — линейка фотодиодов.

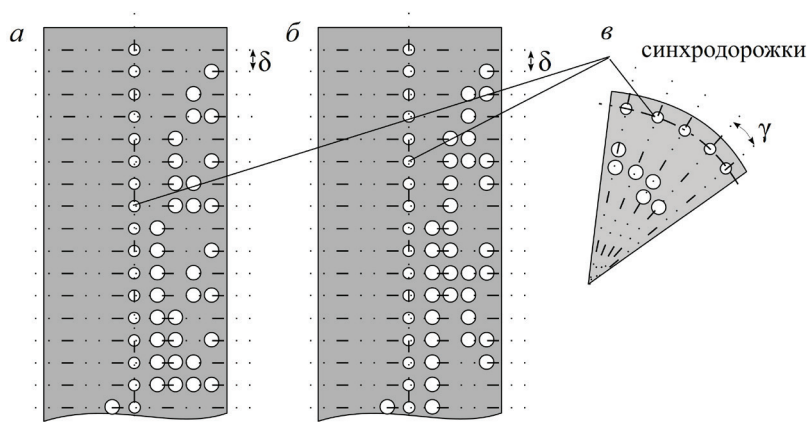


Рис. 16. Подвижные элементы цифровых датчиков перемещений:
а — линейка с позиционным двоичным кодом; б — линейка с кодом Грея;
в — диск-цифра (показана часть диска с кодом Грея)

Вместо перфорированных элементов могут быть использованы штампованные конструкции, имеющие соответствующим образом сформированные выступы. Считывателем в этом случае выступает линейка индуктивных датчиков. Точность измерения (чувствительность) при использовании таких датчиков определяется по величине шага генератора кода, δ — для линейного перемещения, γ — углового (рис. 16). Считывание осуществляется только в момент, когда код находится напротив линейки считывателя. С этой целью на подвижном элементе сформированы синхронизирующие дорожки — посередине линейки и на краю диска. Срабатывание элемента считывателя, расположенного напротив синхронизирующей дорожки, разрешает считывание кода.

3.2. Аналоговое и цифровое представление информации

3.2.1. Сигналы и информация

Все сигналы в системах контроля и управления можно сгруппировать по применяемому физическому носителю информации:

- электрические — постоянный ток, напряжение, потенциал, заряд;
- электромагнитные — переменный ток, радиоволны;
- оптические — фотоны;
- акустические — звук;
- пневматические — газ;
- гидравлические — жидкость;
- механические — положение твердого тела.

Наиболее широко применяемыми в таких системах являются электрические и электромагнитные сигналы. В новых системах контроля и управления все более широкое применение находят оптические сигналы. Пневматические, гидравлические и механические сигналы используются в тех случаях, когда по каким-либо причинам затруднено использование других. Сигналы могут быть *непрерывными* или *дискретными* (с разрывами).

В зависимости от принципа представления информации различают *аналоговые* и *знаковые (цифровые)* сигналы.

Аналоговый — непрерывный сигнал, который в определенном диапазоне может приобретать бесконечное число состояний. При измерениях сигнал и измеряемая величина могут быть представлены в безразмерной форме одинаковыми дифференциальными или алгебраическими зависимостями. Например, изменение температуры среды, в которую помещена термопара, и изменение напряжения на выходе термопары в безразмерной форме практически совпадают (рис. 17).

Знаковый сигнал — это дискретный сигнал, который может приобретать в определенном диапазоне лишь конечное число состояний. При этом каждому состоянию сопоставляется определенный знак (например, цифра). Этот сигнал еще называют цифровым, поскольку наиболее часто в качестве знака используют цифры. В основе знакового представления лежат соглашения, договоренности о значении знаков. Часто такие соглашения оформляются в виде стандартов и протоколов. Эти соглашения используются для кодирования и декодирования информации передатчиком и приемником.

Информация в сигнале представлена в неявной, скрытой форме. Это относится как к знаковым, так и к аналоговым сигналам. Чтобы обмен информацией был возможен, необходимо, чтобы приемник сигнала мог расшифровать его содержание. Последнее обеспечивается соглашениями о кодировании информации. В аналоговом сигнале информацию можно закодировать:

- уровнем сигнала — потенциалом, давлением;
- интенсивностью — величиной тока, скоростью потока жидкости или газа;
- разностью уровней — напряжением постоянного тока, напором жидкости;
- частотой — частотной модуляцией электромагнитных волн, высотой звука, цветом;
- амплитудой — амплитудной модуляцией электромагнитных волн, громкостью звука.

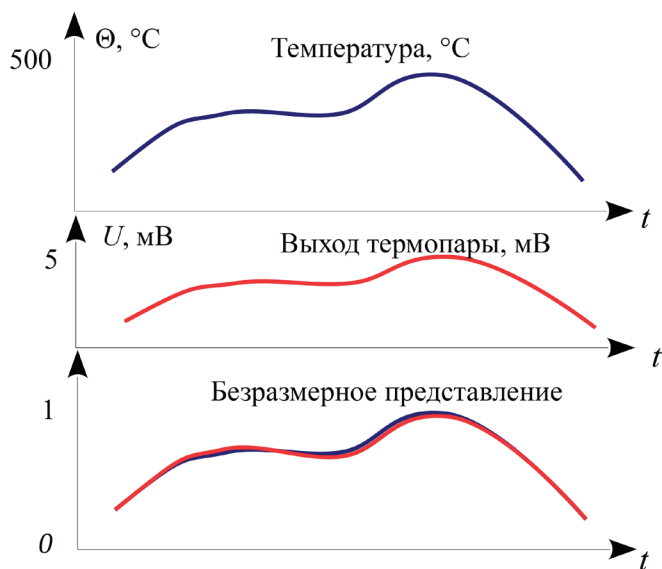


Рис. 17. Аналоговый сигнал при измерении температуры

Для кодирования и декодирования аналогового сигнала используют градуировочные и тарировочные таблицы и графики. Тарировочные таблицы и графики получают путем сопоставления величины сигнала с эталонным значением измеряемой величины. Например, в системах контроля и управления ОМД осуществляют тарирование месдоз путем ступенчатого нагружения эталонной нагрузкой и записи величин сигнала (его уровня или интенсивности), соответствующих приложенной нагрузке.

Для готовых покупных изделий градуировочные таблицы и графики являются паспортными характеристиками. Наиболее важные градуировки закреплены государственными и международными стан-

дартами, например, градуировка термопар определена в российском стандарте ГОСТ Р 8.585–2001 ГСИ «Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования».

При кодировании информации в цифровом сигнале используется многоуровневая система соглашений. Это соглашения о выборе основания кодирования, о способах представления знаков основания, в частности, при двоичной системе — логического нуля («0») и логической единицы («1»), соглашения о представлении цифр и о представлении букв и служебных знаков.

В современных цифровых системах принято основание «2». В этом случае полное множество $\{0,1\}$ содержит всего два элемента — логический ноль и логическую единицу. Они могут быть представлены наличием («1») или отсутствием потенциала («0»), полярностью сигнала, направлением вектора напряженности магнитного поля, наличием («1») или отсутствием («0») тока в цепи, состоянием проводимости транзистора — открыт («1») или закрыт («0»), наличием или отсутствием отверстия на перфорированной ленте (рис. 16) и множеством других способов. В слаботочной автоматике, программируемых логических контроллерах, вычислительной технике используют TTL (транзистор-транзисторная логика) — соглашение, по которому логический ноль представляется потенциалом от 0 до 0,8 В, а логическая единица — потенциалом от 2,5 В до 5 В. Области выше 5 В и ниже 0 В запрещенные зоны, а сигнал с потенциалом между 0,8 и 2,5 В интерпретируется как ошибка.

В промышленных контроллерах используют более мощные сигналы и логические ноль и единица представляются более высокими потенциалами, например, в контроллерах семейства S5 фирмы Siemens напряжение от 0 до 5 В интерпретируется как ноль, а от 12 до 30 В — как единица.

Для представления цифр используют позиционные двоичные числа. Позиции знаков такого числа нумеруются справа налево. Самый правый разряд числа называется младшим разрядом, самый левый — старшим разрядом. Нумерация позиций начинается с 0, следовательно, младший разряд находится в нулевой позиции, а старший в позиции $n - 1$. Одно и то же позиционное число будет иметь различный количественный смысл при разных основаниях счисления. Например, позиционное число 101 в двоичной системе счисления равно десятичной «пятерке», в троичной — это десятичная «десятка», а в десятич-

ной — это просто «сто один». Зная основание счисления, можно любое n -разрядное позиционное число перевести в десятичную форму:

$$A_{10} = a_{n-1} \cdot o^{n-1} + a_{n-2} \cdot o^{n-2} + \dots + a_2 \cdot o^2 + a_1 \cdot o^1 + a_0 \cdot o^0,$$

где a_i — значение разряда $i = 0, \dots, n - 1$. Здесь o — основание счисления. Основание и показатель степени здесь рассматриваются как десятичные числа. Позиционное число «1011» можно перевести из двоичной ($o = 2$) формы в десятичную следующим образом:

$$1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 11_{10},$$

а из троичной (с основанием $o = 3$) —

$$1 \cdot 3^3 + 0 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 1 \cdot 3^0 = 31_{10}.$$

Максимальное значение четырехразрядного позиционного двоичного числа, как нетрудно подсчитать, равно 15. Максимальное значение трехразрядного позиционного двоичного числа равно 7. Таким образом, для кодировки десятичных цифр трех разрядов недостаточно, а четыре разряда будут использованы не полностью. Американский национальный институт стандартов ANSI предложил представлять четырехразрядным позиционным двоичным числом шестнадцать цифр. Для этого пришлось ввести обозначения для цифр больше 9, требующих две позиции в десятичной системе. Эти цифры обозначили заглавными латинскими буквами A, B, C, D, E и F . Полученная кодировка называется шестнадцатеричной, hexadecimal, или hex:

«0»	«1»	«2»	«3»	«4»	«5»	«6»	«7»	«8»	«9»	«A»	«B»	«C»	«D»	«E»	«F»
0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111

Пример использования этой кодировки для перфорации подвижного элемента датчика перемещения показан на рис. 16, а. Для автоматизации такая кодировка недостаточно устойчива к помехам. Действительно, ошибка в одном двоичном разряде, например вместо кода 1100 (12_{10}) прочитался код 0100 (4_{10}), приводит к трехкратному искажению результата — он уменьшился на 6д (см. рис. 16). Был предложен код, в котором любые два последовательных кода различаются лишь значением одного разряда. Такой код получил название «код Грея» (рис. 16, б) по имени его создателя Франка Грея (Bell Labs):

«0»	«1»	«2»	«3»	«4»	«5»	«6»	«7»	«8»	«9»	«A»	«B»	«C»	«D»	«E»	«F»
0000	0001	0011	0010	0110	0111	0101	0100	1100	1101	1111	1110	1010	1011	1001	1000

Этот код еще называют рефлексивным из-за способа его формирования путем последовательного отражения. Последовательность начинают с пары {0 1}. «Отраженная пара» {1 0} добавляется к исходной. После этого, путем приписывания перед исходными числами нуля, а перед отраженными — единицы, формируется новая последовательность уже из четырех двоичных чисел {00 01 11 10}. Процедуру повторяют, пока не получится требуемая длина последовательности, например, восемь {000 001 011 010 110 111 101 100} или шестнадцать чисел.

При этой кодировке ошибка в предыдущем примере (вместо кода 1100 прочитался код 0100) составит всего 8 (рис. 16).

Для алфавитно-цифровых символов была предложена кодировка ASCII, в которой для каждого символа отводили один байт — восьмиразрядное позиционное двоичное число. В этой кодировке десятичные цифры от 0 до 9 представляются шестнадцатеричными числами от 30_{16} до 39_{16} , символ «@» — 40_{16} , *A* — 41_{16} , *B* — 42_{16} и так далее. Кодировка ASCII в системах контроля и управления широко используется до сих пор, но постепенно осуществляется переход к кодировкам UTF8 UNICODE (ISO/EC 10646). В UNICODE кодировки ASCII и ANSI входят как подмножества и, кроме того, имеется возможность использовать национальные кодовые таблицы, например, КОИ-8, являющийся отечественным стандартом на 8-разрядные коды обмена информацией (ГОСТ 19768–93).

В большинстве случаев первичные преобразователи информации выдают аналоговый сигнал. Обработка информации, ее передача по каналам связи более удобны и устойчивы к помехам при цифровой форме сигнала. Поэтому в современных системах сигналы обычно перед передачей и обработкой переводят в цифровую форму. Также возникает необходимость превращения цифрового сигнала в аналоговый, когда, например, вместо числа 13 на выходе устройства управления нужно получить напряжение 13 В. Для преобразования сигнала из цифровой формы в аналоговую используют цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Для обратного преобразования — аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Коротко рассмотрим простейшие идеи, положенные в основу таких преобразователей. Начнем обсуждение с наиболее простого случая — цифро-аналогового преобразователя с использованием управляемой резистивной схемы (рис. 18).

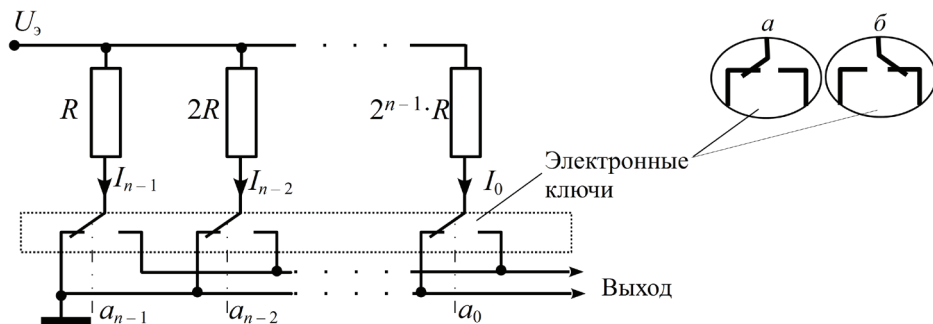


Рис. 18. ЦАП с эталонными резисторами:

a — на входе ключа логический ноль; b — на входе ключа логическая единица

Для понимания работы такой схемы достаточно минимального представления о законах Ома и Кирхгофа. В схеме используются транзисторы, включенные попарно. Управляющий вход одного транзистора подключен напрямую, а второго — через инвертор. При подаче логической единицы один транзистор открыт, другой — закрыт, при подаче логического нуля ситуация меняется на противоположную: открытый транзистор закрывается, а закрытый — открывается. Такую пару можно представить в виде двухпозиционного переключателя (см. рис. 18, a , b). На выходе суммируются токи тех ветвей схемы, у которых значение разряда позиционного двоичного числа a_i равно единице:

$$I = \sum_{i=0}^{n-1} a_i I_i,$$

где $I_1 = 2I_0$; $I_2 = 2I_1 = 4I_0$; ...; $I_{n-1} = 2I_{n-2} = 2^{n-1}I_0$. Подбирая значение R , можно добиться необходимого значения тока

$$I_0 = \frac{U_{\text{э}}}{2^{n-1}R},$$

которое определит точность преобразования — наибольшее отклонение аналогового сигнала от расчетного.

Точность зависит от качества и стабильности эталонного напряжения и качества резисторов. Нужно заметить, что номинал резисторов должен быть выбран с высокой точностью в широком диапазоне. Например, при восьмиразрядном ($n = 8$) ЦАП номиналы первого и последнего резисторов различаются более чем в 100 раз, то есть ошибка в 1 % номинала резистора младшего разряда будет больше номинала

резистора старшего разряда. Кроме точности, ЦАП характеризуются еще разрешающей способностью $\rho = \frac{1}{2^n}$ и временем преобразования, которое равно интервалу времени от момента подачи кода на вход ЦАП до момента достижения выходного значения аналогового сигнала, отличающегося от расчетного не более чем на величину допустимой погрешности.

Существуют схемы ЦАП, использующие другие принципы преобразования, в частности, схемы с резистивной сеткой $R - 2^{n-1}R$, схемы широтно-импульсной модуляции [5]. Токковые нагрузки рассмотренных преобразователей обычно много меньше одного ампера. Для использования таких схем с потребителями, требующими большой мощности, их дополняют усилителями тока и напряжения.

Обратная задача — преобразование аналогового сигнала в цифровой код — требует более сложных решений (рис. 19). Рассмотрим простейшую схему АЦП, идея которой состоит в сравнении входного напряжения с эталонным напряжением, генерируемым встроенным ЦАП. Код ЦАП, при котором эталонное напряжение и измеряемое входное совпали с заданной точностью, выдается на выход АЦП.

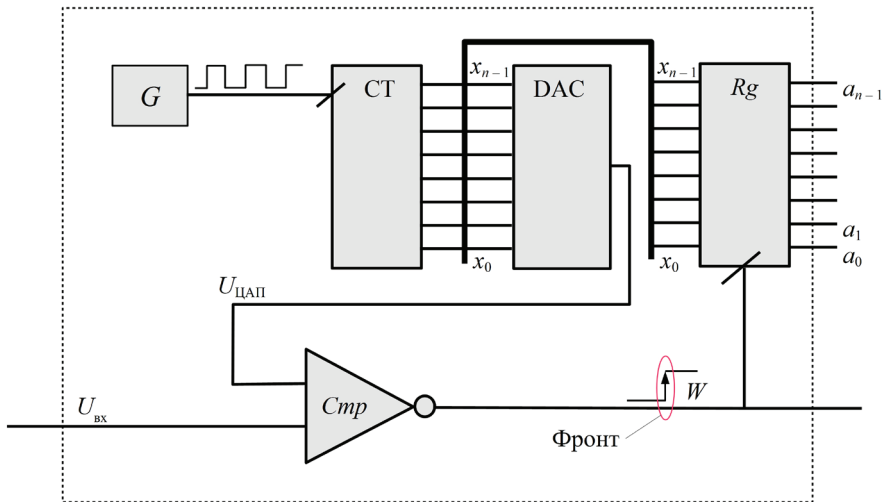


Рис. 19. Схема АЦП

Коротко охарактеризуем элементы схемы. В схеме использован генератор прямоугольных импульсов G . При включении питания схемы он запускается и генерирует бесконечную последовательность прямо-

угольных импульсов с заданной частотой и скважностью. Двоичный счетчик СТ при приходе импульса прибавляет единицу к позиционному n -разрядному двоичному числу и выставляет это число на входы цифроаналогового преобразователя ДАС и регистра-защелки Rg . Когда значение становится максимальным (все разряды числа на выходе счетчика установлены в «1»), прибавление очередной единицы приводит к обнулению всех разрядов, после чего счет начинается сначала. Регистр-защелка Rg по фронту сигнала W переносит код, находящийся в этот момент на его входах, на выход. Компаратор $Стр$ сравнивает два напряжения $U_{ЦАП}$ и $U_{вх}$. Когда их отличие друг от друга становится меньше заданного значения погрешности, выходной сигнал компаратора W переходит из одного состояния в другое. По фронту сигнала W код на входе регистра Rg переписывается на выход и «защелкивается», таким образом новое состояние выхода регистра Rg будет сохранено до следующего прихода фронта сигнала W . Часто сигнал W одновременно выводится на выход АЦП и свидетельствует, что код сформирован. Его в этом случае называют сигналом готовности кода.

Нетрудно догадаться, что если период прямоугольных импульсов равен Δt , то время между двумя отсчетами при постоянном преобразуемом напряжении $U_{вх}$ будет равно времени полного перебора всех двоичных чисел от 0 до $2^n - 1$

$$T_{\text{преобр}} = \Delta t \cdot 2^n.$$

Если измеряемое напряжение убывает, то время преобразования окажется немного меньше; если возрастает, то время преобразования будет немного больше указанной величины. Чтобы уменьшить время преобразования, вместо полного перебора используют метод половинного деления. Точность преобразования АЦП определяется точностью и разрядностью встроенного ЦАП, быстродействием компаратора и регистра-защелки. Диапазон преобразуемых сигналов определяется по величине эталонного (опорного) напряжения ЦАП.

Время преобразования является очень важным параметром при регистрации изменения сигналов. Измерения могут осуществляться через равные промежутки времени. В этом случае говорят о *квантовании (дискретизации) сигнала с постоянным шагом по времени* (рис. 20, а). Величина шага δt в этом случае не может быть меньше времени преобразования $T_{\text{преобр}}$. Регистрируемая величина может быть представлена простым упорядоченным множеством $\{t_0, \delta t, s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где

s_1, s_2, \dots, s_n — величины сигналов в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n ; $t_i = t_{i-1} + \delta t$ (ломаная линия на рисунке). Нужно заметить, что при таком способе квантования возможны потери информации.

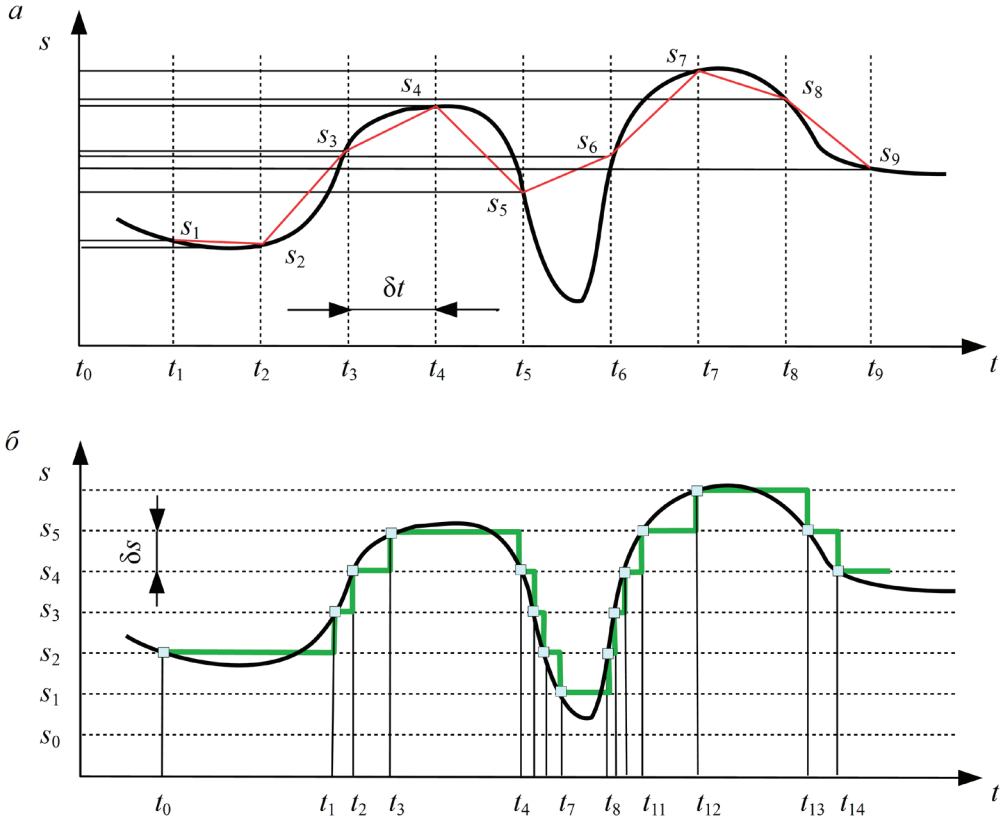


Рис. 20. Дискретизация аналогового сигнала:

a — с постоянным шагом по времени; b — с постоянным шагом по уровню

Например, на рис. 20, a регистрируемый сигнал между точками t_5 и t_6 имеет минимум, который не будет обнаружен. Чтобы избежать потерь информации, необходимо уменьшать шаг между отсчетами. Для правильного выбора шага отсчетов δt нужна априорная информация о частотных характеристиках сигнала. Если частотные характеристики сигнала известны, то можно найти требуемую величину шага. В соответствии с выводами теории информации регистрация сигнала будет происходить без потери информации, если величина шага по времени $\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\max}}$, где f_{\max} — максимальная частота в спектре сиг-

нала. Это отношение известно как формула Винера (Найквиста), или, в отечественной литературе, как теорема Котельникова.

Другой способ квантования сигнала называют *квантованием (дискретизацией) с постоянным шагом по уровню сигнала* (рис. 20, б). При этом варианте дискретизации сразу устанавливают шаг по уровню сигнала δs меньше (или равный) требуемой погрешности измерения.

Множество, полностью описывающее изменение сигнала, состоит из трех начальных параметров $\{t_0, s_0, \delta s\}$ и таблицы из двух строк (столбцов): в первой строке время, во второй — Δ_i , равное $+1$ или -1 в зависимости от того, как изменяется сигнал:

t_i	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}
Δ_i	$+1$	$+1$	$+1$	-1	-1	-1	-1	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	-1	-1

Результат регистрации в этом случае представляется ступенчатой функцией (ломаная линия, см. рис. 20, б). Для момента времени значение уровня сигнала s_i может быть найдено по простой формуле

$$s_i = s_0 + \sum_{k=1}^i \Delta_k \cdot \delta s, \quad 1 \leq i \leq n,$$

где n — количество измерений.

Можно заметить, что при увеличении скорости изменения сигнала частота отсчетов увеличивается и, наоборот, при уменьшении — период между отсчетами возрастает. Потеря информации не выходит за пределы выбранной погрешности. Преобразование сигнала упрощается: достаточно точного измерения в момент времени t_0 сигнала s_0 и наличия прецизионного таймера-хронометра для фиксации моментов перехода сигнала на уровень выше или ниже предыдущего.

Вместо АЦП в этом случае можно использовать два компаратора, которые будут настроены: первый на срабатывание при сигнале $s_i = s_{i-1} + \delta s$, а второй — при сигнале $s_i = s_{i-1} - \delta s$. По сигналу первого компаратора регистрируется текущее время и соответствующее ему значение Δ_i « $+1$ », второго — текущее время и « -1 ». Однако нужно заметить, что пропуск регистрации вследствие случайного сбоя приведет к искажению всех последующих результатов. Поэтому при длительном измерении приходится время от времени осуществлять контроль результатов, что существенно усложняет схему.

3.2.2. Каналы передачи сигналов

Передача информации между элементами системы управления осуществляется по каналам связи. Конструктивно эти каналы могут быть оформлены в виде отдельных проводников, трубопроводов, волноводов, оптоволоконных линий. Электромагнитные сигналы могут распространяться без конструктивно оформленных каналов. Линии могут быть сгруппированы в кабели или шины. В распространенных системах контроля и управления каналы — это в основном электрические линии. Информация по каналам передается в аналоговой или цифровой формах.

Передача может быть последовательной, когда каждое новое состояние следует за предыдущим, или параллельной, когда информация дробится на блоки и каждый блок передается по своему каналу одновременно с другими. При последовательной передаче достаточно одного канала, при параллельной — число каналов не может быть меньше числа параллельно передаваемых блоков. Поэтому при больших расстояниях между приемником и источником информации обычно используется последовательная передача информации. Аналоговые сигналы в этом случае коммутируют — последовательно подключают источники сигнала к линии передачи. Параллельная передача обеспечивает быстрый обмен большими объемами и используется в быстродействующих устройствах обработки сигналов. При цифровом сигнале минимальный размер блока один бит. Для передачи информации с выхода восьмиразрядного АЦП (a_7, a_6, \dots, a_0) или между счетчиком, ЦАП и регистром Rg (x_7, x_6, \dots, x_0) потребуется не менее 8 линий (см. рис. 19). Конструктивно эти линии реализуются параллельно расположенными проводниками на печатных платах или кристаллах, образуя шину. На схемах шина изображается жирной линией. Обычно шина содержит несколько групп линий: адресные, управляющие и информационные.

Как уже было отмечено выше, информация в сигналах кодируется. Выбор системы кодирования определяется спецификой и физической природой сигналов, а также конструктивными решениями элементов системы. Основными требованиями к кодированию являются надежность передачи информации, простота технической реализации, экономичность представления информации, удобство преобразования и коммутации сигнала. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет знаковое, символьное кодирование.

В основе символического кодирования лежит выбор исходной знаковой системы, которая содержит минимально необходимое количество элементарных знаков, позволяющее закодировать любую информацию. Чем меньше знаков, тем экономичнее система кодирования, меньше затраты на хранение, обработку и передачу информации. Группируя элементарные знаки тем или иным способом, можно создать представления сложных символов.

Рассмотрим случай представления таких символов в виде N -разрядных позиционных чисел, когда каждому знаку приписывается вес в зависимости от его позиции при записи или передаче. Если исходная знаковая система содержит n элементарных знаков, то максимальное количество различных сообщений M , представляемое N -разрядным позиционным числом, подсчитывается так:

$$M = n^N. \quad (3.1)$$

Естественное желание иметь одновременно и меньше элементарных знаков, и числа покороче приводит к выводу, что наилучшим выбором будут такие n и N , при которых $nN \rightarrow \min$. Определив из формулы (3.1) N , $N = \frac{\ln M}{\ln n}$, и умножив левую и правую части на n , получим

$$nN = n \frac{\ln M}{\ln n}.$$

Взяв производную по n от правой части и приравняв ее нулю, получим

$$\ln M \left(\frac{1}{\ln n} - n \frac{1}{(\ln n)^2} \frac{1}{n} \right) = \frac{\ln M}{\ln^2 n} (\ln n - 1) = 0.$$

Поскольку $M > 1$ и $n > 1$, то $(\ln n - 1) = 0$, то есть $n = e \approx 2,71$. Ближайшим целым числом является 3, но использование его в качестве основания системы кодирования неудобно по техническим соображениям. Для представления трех знаков потребовалось бы разработать элементы, которые могли бы находиться в трех различных устойчивых состояниях, например: «да», «нет» и «может быть». Каждое устойчивое состояние должно быть отделено от другого полосой запрещенного уровня ненулевой ширины, иначе они станут аппаратно не различимы. Нужно сказать, что современная электроника не налагает физических запретов на создание таких элементов, но пока они уступают двоичным

из-за сложности реализации. Поэтому основание кодирования «2» используется в подавляющем большинстве средств контроля и управления, а также в вычислительной технике.

3.2.3. Помехи в информационных каналах. Характеристики каналов

Для обеспечения надежности работы систем контроля и управления каналы передачи информации должны быть защищены от помех. В цехах обработки металлов давлением наличествует громадное количество разнообразных помех — вредных сигналов, искажающих информацию. Это наиболее распространенные электромагнитные помехи, электрические, магнитные, сейсмические, акустические, оптические, помехи механического происхождения, тепловые, гальванические и другие. Источниками электромагнитных помех являются мощные прерыватели, электродуговая и контактная сварка, двигатели постоянного тока, высокочастотные преобразователи тока и напряжения, тиристорные системы управления двигателями и другое. Эти помехи вызывают «наводки» в проводниках и электронных схемах систем управления.

Электрические помехи возникают при электризации трущихся изоляционных материалов, при движении транспортерных лент, от высоковольтных линий постоянного тока и характеризуются появлением электрического заряда на изолирующих элементах систем. Они искажают сигналы от пьезоэлектрических датчиков, нарушают работу электронных усилителей, могут вызывать пробой изоляции.

Магнитные помехи возникают при работе мощных крановых магнитов, магнитных муфт, при протекании постоянного электрического тока большой мощности в гальванических и электролизных цехах. Они влияют на работу индуктивных и электромагнитных датчиков, на работу электронных и магнитных усилителей.

Сейсмические помехи характерны для цехов, оснащенных мощными молотами. Эти помехи (сотрясения) распространяются по земле, фундаментам, металлическим конструкциям и могут вызывать сбои в работе первичных преобразователей информации, прецизионных измерителей деформаций и перемещений, акселерометров и других элементов, чувствительных к вибрациям и ускорениям.

Акустические помехи возникают при работе ротационных ковалочных машин, помещении изделий в коробки и карманы, при работе пил трения, подаче звуковых сигналов, от неисправного оборудования, при правке в косовалковых машинах от ударов вращающегося изделия о проводки. Как и сейсмические, акустические помехи вызывают сбои в работе датчиков и элементов, чувствительных к вибрациям. Сочетание акустических и магнитных помех может приводить к наводкам в каналах передачи информации из-за эффекта перемещения проводника в магнитном поле.

Оптические помехи возникают при сварке, химических вспышках, мощных электрических разрядах, в том числе и естественного происхождения, при попадании прямого солнечного света через окна и отражающие поверхности. Оптические помехи вызывают сбои в работе фотоэлементов, инфракрасных систем передачи информации, лазерных измерителей. Механические помехи возникают по причине зазоров при износе элементов, передающих информацию, при трении в подшипниках и сочленениях. Эти помехи характерны для старых систем с большим количеством механических трансмиссий.

Тепловые помехи связаны с изменением сопротивления проводников при изменении температуры, из-за возникновения термоЭДС при контакте разнородных металлов. Даже две стали разного химического состава при контакте могут создавать термоЭДС, зависящую от температуры. При изменении температуры изменяются свойства полупроводниковых и изолирующих материалов, что приводит к искажениям в работе датчиков и электронной аппаратуры.

Гальванические помехи возникают при попадании двух проводников с разным электрохимическим потенциалом в электролит. Электролит это необязательно ванны для травления и обезжиривания. Достаточно оседания росы на контактах в условиях цеха, в атмосфере которого присутствуют и соли в виде пыли, и газы, растворимые в воде, — аммиак, хлор, окислы азота от сварки. Гальванические помехи могут быть весьма значительными. Например, напряжение гальванической пары Cu—Zn более 1,5 В, что многократно превышает значение сигнала большинства датчиков.

Защититься от помех можно несколькими способами. Все способы можно грубо разделить на две группы — аппаратные и организационные. Для аппаратных способов используют изоляцию и компенсацию.

При *изоляции* пытаются поставить между полезным сигналом и помехой барьер, препятствующий их смешиванию. Для электромагнитных помех таким барьером являются экраны — заземленные оболочки и навивки, изготовленные из проводящих материалов. Такую защиту называют экранированием. Экранирование применяется и для защиты от электрических и магнитных помех. В последнем случае для оболочек используют магнитомягкие материалы, например пермаллой. Изоляция от сейсмических помех обеспечивается использованием подушек и рессор. Материалами для подушек служат резина, дерево, песок. Для особо чувствительных приборов и устройств используют пружинные растяжки. Акустические помехи экранируют пористыми и волокнистыми плитами и оболочками. Изоляция (экранирование) оптических помех не представляет трудностей. Это бленды, тубусы из непрозрачных материалов, плотные двери шкафов КИП и автоматики, оптические и поляризационные фильтры. Хуже обстоит дело с защитой от тепловых помех. Тепловые экраны неэффективны, если не имеют системы для поддержания их температуры на заданном уровне. Для стабилизации температуры экрана может, в свою очередь, потребоваться автоматическая система охлаждения. Иногда для стабилизации теплового режима используют фазовые переходы: твердое тело — жидкость, жидкость — газ (пар). Однако этот способ требует значительного расхода охлаждающей субстанции. Хорошо, если это вода... А иногда это может быть сжиженный газ — азот или гелий.

Гальванические помехи не возникнут, если каналы связи и другие элементы систем не содержат участков открытого металла-проводника. С этой целью их покрывают водостойкими нерастворимыми покрытиями — лаками и компаундами.

Другой аппаратный способ защиты от помех — *компенсация* (от латинского *compensatio* — возмещение). Ошибка, создаваемая помехой, «возмещается» за счет свойств помехи путем использования компенсаторов. Компенсатор — устройство для устранения влияния вредных факторов на состояние работы машины, прибора, канала передачи информации. В частности, эффект компенсации возникает при работе катушек с «бифилярными» обмотками. Электрические наводки в одной ветви проводника, возникающие при помехах, компенсируются такими же, но противоположного направления в другой ветви. Для этого провод складывают вдвое и полученной петлей навивают обмотку.

Часто для компенсации используют различие частотных характеристик и спектров помех и полезного сигнала. Вследствие случайного характера помехи ее значение может как добавляться к сигналу, так и вычитаться из него. Средний вклад такой помехи в сигнал окажется небольшим. Помеха, математическое ожидание которой равно нулю, у связистов называется белым шумом. Сигналы же обычно изменяются в соответствии с изменением контролируемых параметров и подчиняются определенным закономерностям, повторяются. Поэтому если пропустить сигнал через интегрирующее устройство, то на выходе останется только значение интеграла от сигнала (рис. 21). В качестве интегратора может выступать любая емкость. Для жидкостей и газов — напорные и расширительные баки, для электромагнитных и электрических сигналов — обычный конденсатор большой емкости, включенный параллельно в электрическую цепь, индуктивность, последовательно включенная в цепь постоянного тока, использование бифилярных проводов. Все эти устройства обеспечивают хорошую компенсацию помех, частота которых значительно выше частоты сигнала. Для компенсации акустической помехи могут быть использованы резонаторы, настроенные на частоту полезного сигнала.

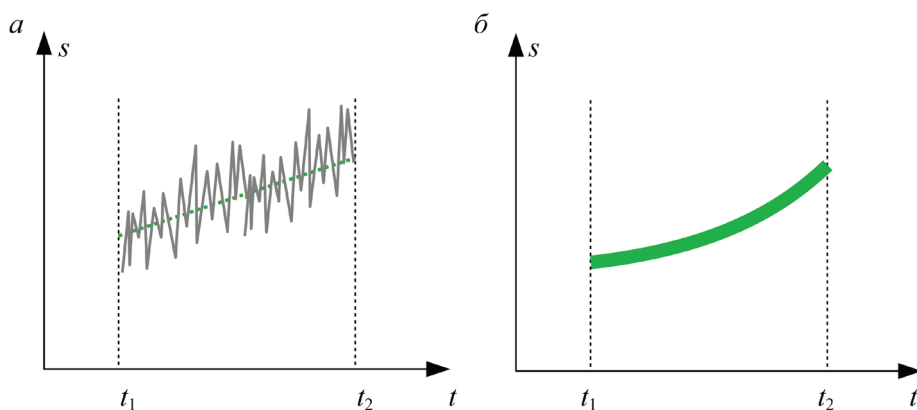


Рис. 21. Компенсация помехи интегрированием:

a — полезный сигнал (пунктирная прямая линия) и помеха (ломаная линия);

$б$ — сигнал после интегрирования

Иногда применяются очень сложные устройства для подавления помех. Если, например, известно направление на источник помехи, то в этом направлении выдвигается на некоторое расстояние приемник, обнаруживающий помеху. Специальное устройство генерирует

сигнал помехи в противофазе — эхо. Эхо и помеха складываются, взаимно погашаются, компенсируются (рис. 22).

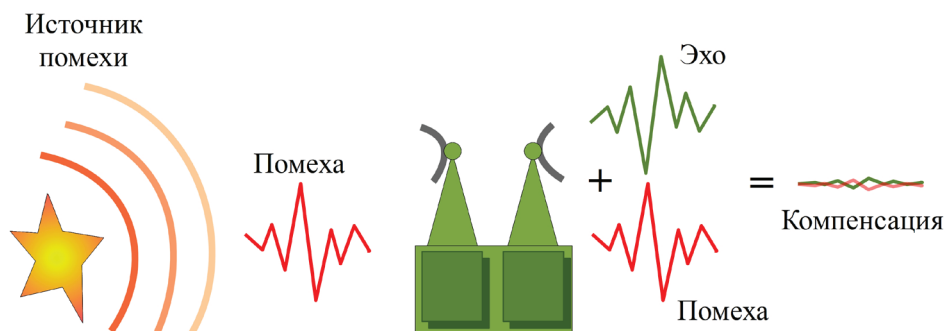


Рис. 22. Компенсация помехи с помощью эхосигнала

Такие устройства весьма эффективные, но дорогостоящие, и поэтому редко используются в промышленных системах контроля и управления. Кроме того, недостатками такого способа подавления помех являются:

- необходимость разнесения приемника и генератора эха на расстояние, достаточное для того, чтобы за время прохождения помехой этого расстояния генератор успел обработать помеху и выдать ее в противофазе;
- защищенность только тех объектов, которые находятся за подавителем на прямой линии, соединяющей источник помехи, подавитель и защищаемый объект.

К организационным методам борьбы с помехами относят многократное повторение передачи сигнала и дублирование каналов, использование избыточного кодирования, использование расписаний.

Дублирование каналов и многократное повторение передачи информации приводит к дополнительным затратам и снижению быстродействия автоматических устройств, не обеспечивая полной защиты от помех. Если сигналы по дублированным каналам различаются, то возникает вопрос: по какому каналу поступила достоверная информация. При многократном повторении одного сигнала этот вопрос решается статистической обработкой, которая тоже не гарантирует восстановления информации при сильных помехах. Поэтому в современных цифровых системах наиболее часто используют избыточное кодирование.

Смысл такого кодирования заключается в том, что каждый блок информации сопровождается дополнительными контрольными кодами, позволяющими приемнику информации обнаружить ошибку и запросить повторную передачу. Наиболее простым способом избыточного кодирования является использование проверки на четность. С этой целью каждый передаваемый байт дополняется одним битом, который устанавливается в «0», если число единиц в переданном байте четное, и — в «1», если в переданном байте нечетное число единиц. Таким образом, приемник получает девятибитную посылку, в которой всегда четное количество единиц. Получив посылку, приемник подсчитывает количество единиц и, если оно оказалось нечетным, запрашивает повторение передачи. Дополнительный бит носит название *бита четности*. В таблице его значение выделено жирным шрифтом. Генерация этого бита передатчиком и проверка его приемником очень легко реализуются аппаратно. Использование бита четности позволяет приемнику обнаружить ошибку в одном бите. Если одновременно произошло две ошибки, то они обнаружены не будут: число единиц осталось четным.

Передача четного и нечетного байтов

Бит четности	Номер бита в байте								Количество единиц в байте
	7	6	5	4	3	2	1	0	
1	1	0	1	0	1	0	1	1	5 — нечетное
0	0	1	0	1	0	1	0	1	4 — четное

Существуют другие более мощные методы избыточного кодирования, позволяющие не только обнаружить ошибку, но и в ряде случаев восстановить информацию. Это, например, метод кодов Хемминга, который позволяет находить и исправлять одиночные ошибки. Необходимое количество дополнительных битов x должно удовлетворять отношению, известному из теории информации, $x \geq \log_2 (1 + n + x)$, где n — количество разрядов защищаемого позиционного числа. Для обнаружения и исправления одиночной ошибки в восьмиразрядном коде достаточно иметь четыре дополнительных бита $4 \geq \log_2 (1 + 8 + 4) \approx 3,71$.

При пакетной передаче информационные пакеты дополняют служебными, содержащими контрольную сумму передаваемого пакета. Приемник подсчитывает по известному ему алгоритму контрольную сумму принятого пакета. Несовпадение переданной и подсчитанной

контрольных сумм свидетельствует об ошибке. Обычно в этом случае приемник запрашивает повторную передачу пакета. Еще одним организационным способом защиты от помех является использование «расписаний», когда прием и передача информации осуществляются в согласованные моменты времени. Эти моменты могут быть выбраны с учетом графика работы мощных источников помех. Например, составляется расписание сварочных работ, включения и выключения мощных потребителей энергии, работы копров, вызывающих сейсмические помехи. Однако этот способ борьбы с помехами для средств автоматики не обеспечивает необходимой надежности, поскольку трудно согласовать расписания на достаточно длительный период. Кроме того, вероятность нарушения расписания участниками соглашения весьма высока.

К основным характеристикам каналов передачи информации обычно относят пропускную способность, затухание сигнала и помехоустойчивость. Пропускная способность, или емкость, канала определяется предельной скоростью передачи символов. Количественно пропускная способность C (capacity) оценивается по логарифмической величине $C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log_2 q}{T}$, где q — количество символов, передан-

ное за время T . Для циклически повторяющейся передачи T равно времени одного цикла. Предельная скорость передачи V определяет минимально возможное время передачи одного знака $\Delta t = \frac{1}{V}$. За вре-

мя T можно передать n знаков, $n = \frac{T}{\Delta t} = VT$. При бинарном (двоичном)

кодировании по линии передаются только знаки «1» и «0», что позволяет за время T передать не более q комбинаций сигналов (символов) $q = 2^n = 2^{VT}$, и емкость канала из одной линии в этом случае просто равна предельной скорости V : $C = \frac{\log_2 2^{VT}}{T} = V$. При k параллельных лини-

ях в канале за время импульса Δt можно передать символ, кодируемый сочетанием из k знаков. Всего так можно закодировать 2^k различных кода. Часть таких кодов $m \leq 2^k$ может быть с помощью соглашений наделена смысловым содержанием, например, быть знаками алфавита. Остальные коды могут оказаться неинформативными, например, при кодировании четырьмя битами только десятичных цифр шесть кодовых комбинаций остаются неиспользованными. В этом случае $q = m^{VT}$

и емкость канала $C = \frac{\log_2 m^{VT}}{T} = V \log_2 m$. Пусть по каналу из четырех параллельных линий передаются только десятичные цифры ($m = 10$). Время импульса $\Delta t = 0,001$ с, тогда $C = \frac{\log_2 m}{\Delta t} = 1000 \log_2 10 \approx 3321,5$. Если вместо десятичных передавать шестнадцатеричные цифры, то все возможные коды из 4 битов будут задействованы ($m = 16$), $C = \frac{\log_2 16}{\Delta t} = 4000$, и пропускная способность канала увеличится в 1,2 раза.

Ширина диапазона пропускаемых частот ΔF и уровень помех определяют при аналоговой передаче информации пропускную способность канала связи. Ширина диапазона пропускаемых частот зависит от конструктивных особенностей канала. По обычному медному или алюминиевому проводу можно передавать низкочастотные сигналы ΔF не более десяти кГц. Передаваемые по витой паре и коаксиальному кабелю частоты обеспечивают ширину диапазона пропускаемых частот ΔF в несколько мегагерц, оптоволоконные линии — в несколько гигагерц. Если известна мощность полезного сигнала P_S и мощность шума P_N , то пропускная способность канала будет определена так:

$$C = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right), \text{ 1/с.} \quad (3.2)$$

Если мощность шума и мощность полезного сигнала одинаковы, то пропускная способность аналогового канала равна разрешенной полосе частот ΔF . Из формулы (3.2) следует, что с увеличением мощности помехи (шума) пропускная способность канала уменьшается при постоянной мощности сигнала. Но она никогда не становится равной нулю при ненулевой ширине полосы частот. Это означает, что из любого сколь угодно слабого сигнала при многократном его повторении можно извлечь скрытую в нем информацию. Так, еще в прошлом веке с помощью радиолокации был изучен рельеф планеты Венера. Мощность шума при этом в несколько миллионов раз превышала мощность отраженного от планеты сигнала.

При протяженных линиях связи важной оценкой качества канала связи является степень затухания сигнала. Она определяется по ослаблению мощности сигнала от входа до выхода канала. Количествен-

но затухание оценивается по величине $Q = \ln \left(\frac{P_{Sn}}{P_{Sx}} \right)$, где P_{Sn} — мощность сигнала на входе канала; P_{Sx} — мощность сигнала на выходе канала. Единицей измерения является непер, соответствующий ослаблению сигнала в e (2,71) раз на линии длиной 1000 м.

Помехоустойчивость цифровых каналов оценивается по количеству ошибок на один килобит переданной информации, аналоговых каналов связи — по изменению отношения сигнал-шум от входа до выхода канала. При постоянной мощности помехи оценка помехоустойчивости аналогового канала совпадает с оценкой затухания.

4.

Статика и динамика управляемых объектов

4.1. Статика и динамика. Функциональные схемы

При работе любой автоматической системы реализуется два варианта развития событий [6–8]:

- переход системы из одного состояния в другое и изменение связанного с состоянием выходного процесса в результате изменения входного воздействия. Как правило, этот переход продолжается некоторое время и после окончания изменений входного воздействия. Продолжительность и закон изменения состояния и выходного процесса зависят от времени t . Эта зависимость определяется свойствами системы, ее емкостью — способностью запасать кинетическую и потенциальную энергию. Сами изменения — переходные процессы моделируются дифференциальными и интегро-дифференциальными уравнениями движения и составляют предмет *динамики* системы;
- установившееся состояние. Входное воздействие отсутствует или постоянно. Все изменения состояния и выходного процесса завершились. Производные по времени в уравнениях движения равны нулю. Аргумент t во всех уравнениях может быть опущен. Такое независящее от времени состояние системы называется «статическим» и изучается в разделе *статика*.

Статику и динамику автоматических систем рассмотрим на примере системы автоматического регулирования (САР). Ранее было проведено различие между системами автоматического управления — САУ, в которых контролируемые параметры изменяют по заданному закону,

и системами автоматического регулирования — САР, предназначенными для поддержания контролируемых параметров на заданном уровне.

САР — наиболее распространенные системы контроля и управления в цехах металлургических предприятий. Они используются для поддержания требуемых размеров полосы при непрерывной прокатке, постоянной частоты вращения приводов, заданной температуры в нагревательном пространстве печи, необходимого давления в системах подачи газов и жидкостей. При прокатке регулируется натяжение, скорости прокатки, толщина полосы, величина петли и другие параметры. При прессовании — скорости экструзии, давление жидкости в системе, расход жидкости, сила прессования и тому подобное. Однако, вне зависимости от назначения, принципы и устройство САР остаются одинаковыми. Они содержат элементы, которые могут быть разными конструктивно, но выполнять в системах одинаковые функции. Отвлекаясь от конструктивных особенностей элементов, всю систему автоматического регулирования можно представить в виде функциональных цепей — функциональных схем.

На рис. 23 приведена типовая функциональная схема САР с одним контролируемым параметром $x(t)$. Ранее было отмечено, что в структурной схеме расположение элементов определено их связями, а в функциональной — последовательностью действий, функций, выполняемых элементами.

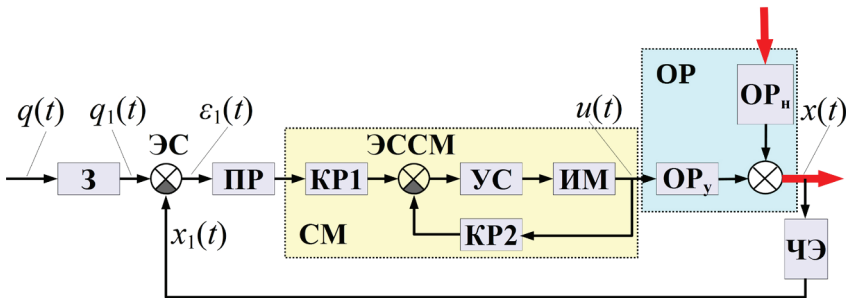


Рис. 23. Типовая функциональная схема САР

Основным элементом, как и в структурной схеме, является объект управления. При анализе САР его обычно называют объектом регулирования и обозначают ОР. Контролируемым параметром $x(t)$ объекта регулирования может быть температура, частота вращения, натяжение, толщина полосы, давление и другое. Измерение этого параметра

тра, определение его величины — первичное преобразование информации в сигнал осуществляется сенсорным устройством, датчиком. Поскольку этот элемент должен «почувствовать, ощутить» значение параметра, постольку его еще называют чувствительным элементом. На схеме он обозначен ЧЭ с выходом $x_1(t)$. От подсистемы настройки в САР остается только задатчик — преобразователь «уставки» $q(t)$ — заданного значения контролируемого параметра — в величину $q_1(t)$, удобную для сравнения с результатом измерений $x_1(t)$. Например, если чувствительный элемент — тахометр — выдает пропорциональный частоте вращения сигнал $q_1(t)$ в вольтах, то и задатчик должен установить сигнал в вольтах, пропорциональный требуемой частоте вращения $q(t)$ (обязательно с тем же коэффициентом пропорциональности). В качестве подсистемы оценки состояния в функциональной схеме выступает «элемент сравнения» ЭС, сравнивающий сигналы $q_1(t)$ и $x_1(t)$. Разность $\varepsilon_1(t) = q_1(t) - x_1(t)$ пропорциональна отклонению $\varepsilon(t)$ контролируемого параметра $x(t)$ от установленного значения $q(t)$, $\varepsilon(t) = q(t) - x(t)$. Преобразователь ПР преобразует сигнал $\varepsilon_1(t)$ в сигнал другой физической природы, более удобный для дальнейшего использования. Преобразованный сигнал может напрямую использоваться в качестве управляющего воздействия, однако чаще он поступает на вход сервомеханизма СМ, содержащего корректирующие элементы КР1 и КР2, вспомогательный элемент сравнения ЭССМ, усилитель мощности УС и исполнительный механизм ИМ. Корректирующие устройства повышают устойчивость работы САР и улучшают динамику системы.

Исполнительный механизм непосредственно воздействует на регулируемый орган объекта регулирования. Если для регулирования используется перемещение регулирующего органа (задвижка, клапан, заслонка, реостат), то моторы исполнительного механизма ИМ, осуществляющие такое перемещение, называют сервомоторами. Элементы сравнения, выполняющие простую арифметическую функцию, называют сумматорами (рис. 24, а).

Закрашенный сектор сумматора обозначает, что соответствующий сигнал вычитается, светлый сектор — сигнал прибавляется. Все компоненты функциональной схемы — функциональные звенья (рис. 24, б), кроме сумматоров, имеют один вход и один выход. Если какой-либо элемент системы имеет несколько входов: объект регулирования имеет входы по нагрузке и управлению, датчик-сенсор реагирует на контролируемый параметр и на помеху, — то такой элемент представля-

ют набором функциональных звеньев, а его выход — суперпозицией выходов звеньев через сумматор (рис. 24, в).

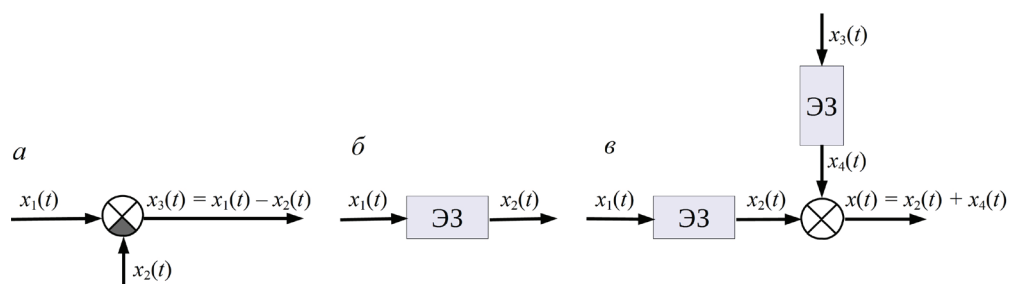


Рис. 24. Компоненты функциональных схем:

a — сумматор; b — элементарное звено (ЭЗ);

v — суперпозиция звеньев для элемента с двумя входами

Аргумент t в функциональной схеме используется при представлении динамического переходного процесса. При моделировании статистики системы зависимость от времени отсутствует, и этот аргумент должен быть опущен.

4.2. Статика САР

4.2.1. Статические характеристики звена

Для каждого элементарного звена существует уравнение, моделирующее связь между входом и выходом в установившемся, не зависящем от времени, состоянии. Это уравнение называют *статической характеристикой* звена. Строится статическая характеристика по точкам: устанавливают значение входного воздействия и поддерживают его постоянным, после перехода выхода звена в установившийся режим (прекращение изменения) регистрируют значение выхода, устанавливают следующее значение входа, регистрируют выход и так далее для всего диапазона возможных значений входа. Возвращаясь ко второй главе, можно сказать, что тарировочный график месдозы есть не что иное, как ее статическая характеристика. На рис. 25 показаны примеры статических характеристик полевого транзистора и двигателя постоянного тока.

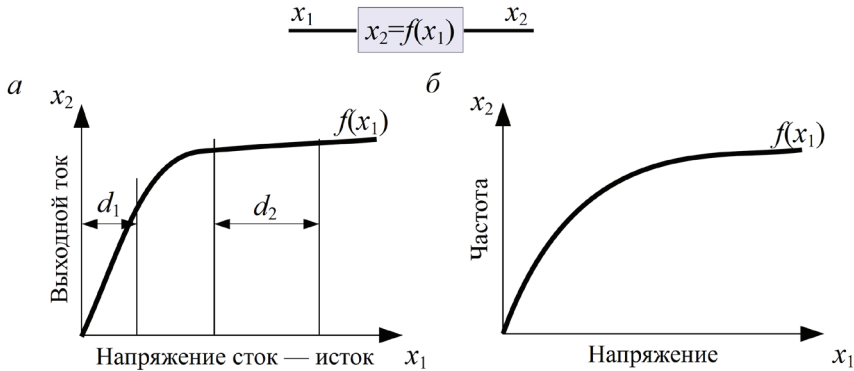


Рис. 25. Статические характеристики полевого транзистора (а) и двигателя постоянного тока (б)

На большом диапазоне значений входного сигнала уравнение статики $x_2 = f(x_1)$ обычно бывает нелинейным. Однако в большинстве случаев можно указать такой диапазон, на котором характеристика близка к линейной. Такие характеристики называют *нелинейными линейризуемыми*. Для транзистора (рис. 25, а) можно указать два таких диапазона d_1 и d_2 . Они отличаются наклоном характеристики к оси x_1 . Наклон — первая производная статической характеристики по x_1 в произвольной точке, называется *крутизной характеристики* в этой точке x_1^* . Диапазон d_1 обычно используют при усилительном режиме работы транзистора, d_2 — при работе в режиме ключа. При конструировании системы автоматического регулирования стремятся выбирать звенья, имеющие характеристики с большими линейными или близкими к линейным участками (рис. 26, а). Если ширина такого участка достаточна для всего диапазона изменения входного сигнала, то на этом участке выбирается *рабочий диапазон* характеристики. Середина рабочего диапазона называется *рабочей точкой*. Звено выбирается таким образом, чтобы номинальное значение входного сигнала было равно рабочей точке характеристики x_{1p} . В окрестности рабочей точки характеристику линейризуют — заменяют ее отрезком прямой линии с наклоном, равным крутизне характеристики в рабочей точке. Для линейризации можно воспользоваться разложением уравнения статики в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки:

$$x_2 = f(x_1) \approx f(x_{1p}) + \left. \frac{\partial f(x_1)}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{1p}} (x_1 - x_{1p}).$$

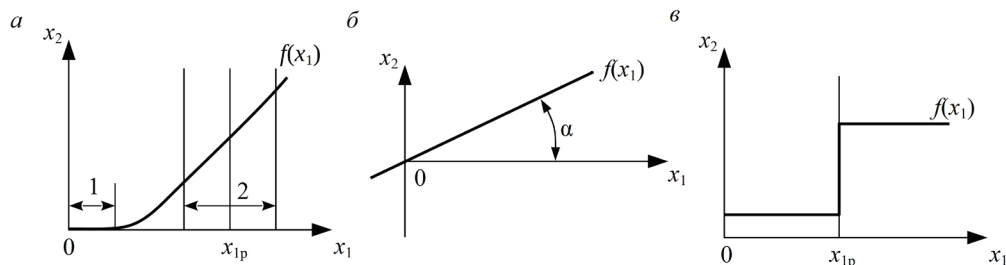


Рис. 26. Типы статистических характеристик:

а — нелинейная линейризуемая характеристика (1 — зона нечувствительности; 2 — рабочий диапазон; x_{1p} — рабочая точка); *б* — линейная характеристика; *в* — релейная (нелинейризуемая)

Крутизна характеристики в рабочей точке иначе еще называется коэффициентом усиления звена. Введя обозначения $b = \left. \frac{\partial f(x_1)}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{1p}}$ и $a = f(x_{1p}) - bx_{1p}$, можно заменить уравнение статики линейным уравнением

$$x_2 \approx a + bx_1,$$

где b — коэффициент усиления, он численно равен тангенсу угла наклона характеристики в рабочей точке. Для линейных характеристик (рис. 26, б) он во всех точках одинаков и равен $\operatorname{tg} \alpha$. В качестве рабочей точки данной характеристики обычно выбирают $x_{1p} = 0$, и уравнение статики записывают в виде $x_2 = kx_1$. Характеристики, у которых в рабочей точке не существует производная, называются *существенно нелинейными*, или нелинейризуемыми (рис. 26, в). Два участка этой характеристики имеют нулевую крутизну. Единственная точка, в которой мгновенно меняется состояние звена — точка $x_1 = x_{1p}$, должна быть выбрана в качестве рабочей. Производная в этой точке не определена, поэтому линейризация характеристики невозможна. Такая характеристика свойственна двухпозиционным элементам — прерывателям, контакторам путевым выключателям и реле. От последнего эта характеристика получила название *релейной*.

4.2.2. Статическая характеристика соединения звеньев

Уравнение статики для соединения звеньев конструируется из простых соотношений. Обычно рассматривают два типа соединений: последовательное (рис. 27, *а*) и параллельное (рис. 27, *б*). Наиболее простой случай — линейные статические характеристики $f_1(x_1) = k_1x_1$, $f_2(x_2) = k_2x_2$. В этом случае статическая характеристика соединения остается линейной. Коэффициент усиления соединения равен произведению коэффициентов усиления отдельных звеньев — $x_3 = f(x_1) = kx_1 = k_1k_2x_1$. При последовательном соединении n звеньев с линейными статическими характеристиками, статическая характеристика соединения остается линейной, а коэффициент усиления равен произведению коэффициентов всех звеньев

$$x_{n+1} = f(x_1) = kx_1, \quad k = \prod_{i=1}^n k_i.$$

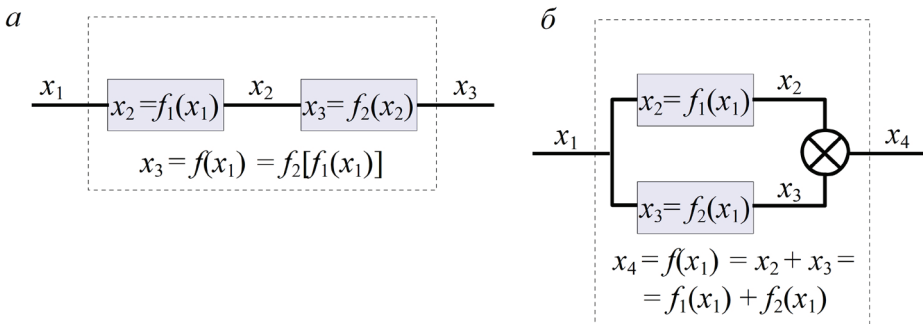


Рис. 27. Статическая характеристика последовательного (*а*) и параллельного (*б*) соединения

При параллельном соединении статическая характеристика соединения определяется суммой статических характеристик звеньев. При линейных характеристиках звеньев характеристика соединения тоже линейна, а коэффициент усиления равен сумме коэффициентов усиления отдельных звеньев

$$x_{n+1} = f(x_1) = kx_1, \quad k = \sum_{i=1}^n k_i.$$

Если функциональная схема содержит и последовательные и параллельные участки (смешанное соединение), то ее расчленяют на группы,

в которых присутствует только один тип соединения. Каждую группу заменяют звеном, для которого находят статическую характеристику. Группировку и замену повторяют, пока не останется одно звено.

4.3. Динамика САР

4.3.1. Элементарное динамическое звено

В основе всех динамических явлений, протекающих при работе САР, лежит одно важнейшее свойство — инерционность. Оно определяет, как быстро будет изменять свое состояние объект при одном и том же воздействии. Например, изменение скорости v тела при воздействии силы F (прямолинейное движение)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}, \quad (4.1)$$

или частоты ω при приложении момента сил M (вращение)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{I} \quad (4.2)$$

будет разным в зависимости от массы m или момента инерции I . Таким образом, масса и момент инерции определяют инерционность движущегося тела в механике (рис. 28, а, б).

Уравнения (4.1) и (4.2) в механике носят название «уравнения движения». Это понятие мы будем применять и к другим моделям изменения состояния системы в результате входного воздействия. Аналогично этому инерция электрических цепей определяется по величинам емкости и индуктивности (рис. 29, а, б).

В гидравлических и пневматических системах подобную роль играют промежуточные резервуары и ресиверы. Изменение выхода в этих цепях описывается более сложными уравнениями движения. Инерционность может проявляться иначе. Например, входное воздействие может вызывать изменение выхода спустя некоторый промежуток времени, например, изменение потока вещества на выходе ленточного транспортера длиной l , движущегося со скоростью v , произойдет через $\tau = \frac{l}{v}$ секунд после изменения подачи вещества на входе (рис. 30).

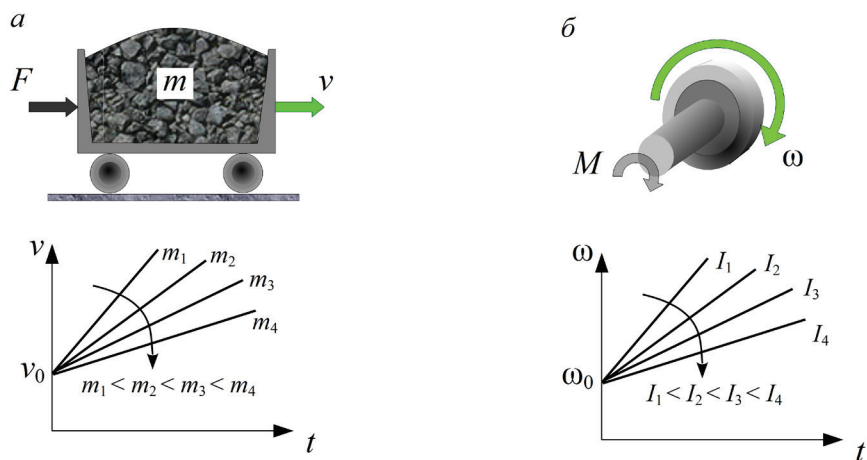


Рис. 28. Инерционность объектов управления:

a — поступательное движение; *б* — вращение

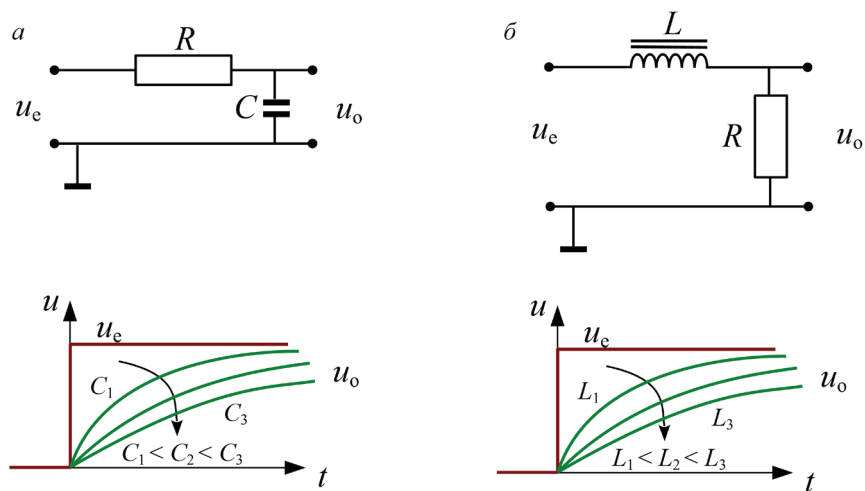


Рис. 29. Инерционность электрических цепей:

a — цепь с конденсатором (с емкостью); *б* — цепь с индуктивным элементом

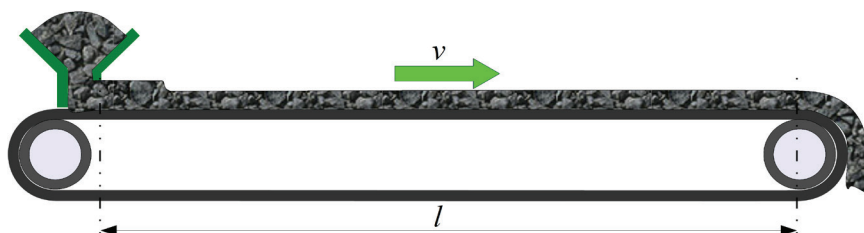


Рис. 30. Ленточный транспортер

У некоторых элементов инерционность может быть пренебрежимо малой, у других — очень большой. Понятно, что такие элементы будут вести себя в системах автоматики по-разному. Поэтому в зависимости от инерционности при анализе систем автоматического регулирования выделяют несколько типов элементарных динамических звеньев.

Будем при дальнейшем обсуждении использовать условное изображение динамического звена (рис. 31). На входе у него сигнал $u(t)$, на выходе — $x(t)$.

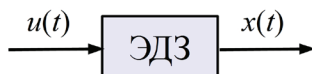


Рис. 31. Элементарное динамическое звено

Очень часто инерционностью отдельных звеньев можно пренебречь в отличие от инерционности других звеньев САР. Например, пренебрегают инерционностью электронного усилителя в системе с наличием механических, пневматических и гидравлических элементов. Однако в системе, содержащей только электронные компоненты, такое пренебрежение может привести к грубым ошибкам. Иногда изготавливают специальные облегченные конструкции, обладающие малой инерционностью, для использования в приборах и цепях обработки информации. Это, например, мотор Варрена — миниатюрный приборный асинхронный двигатель, ротор которого изготовлен в виде фольгового стаканчика. При анализе функциональных схем для описания таких звеньев используют идеализацию «идеальное безынерционное звено». Уравнение движения для безынерционного звена записывается наиболее просто

$$x(t) = k_n u(t), \quad (4.3)$$

где k_n — коэффициент передачи, он численно совпадает с коэффициентом усиления линейной статической характеристики такого звена. При нелинейной статической характеристике обычно используется некоторое условное усредненное значение этого коэффициента. Уравнение (4.3) показывает, что любое изменение сигнала на входе звена мгновенно производит пропорциональное изменение сигнала на выходе. Поэтому это звено часто называют *пропорциональным*.

Более сложный случай имеет место, если скорость изменения выходного сигнала пропорциональна сигналу на входе. Учитывая, что

скорость — это первая производная по времени, запишем уравнение движения:

$$\frac{dx(t)}{dt} = k_{\text{и}} \cdot u(t). \quad (4.4)$$

Звено, которое описывается таким уравнением движения, называется *идеальным интегрирующим звеном*. Действительно, при нулевом начальном условии $x(0) = 0$ сигнал на выходе этого звена $x(t)$ пропорционален интегралу от входного сигнала $u(t)$

$$x(t) = k_{\text{и}} \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau. \quad (4.4)$$

Коэффициент передачи идеального интегрирующего звена $k_{\text{и}}$ при одинаковой размерности сигналов на входе и выходе звена имеет размерность с^{-1} . Поэтому вместо $k_{\text{и}}$ принято использовать размерную величину $\frac{1}{T_{\text{и}}}$. Величину $T_{\text{и}}$, имеющую размерность времени, называют «постоянная времени идеального интегрирующего звена». Если размерности сигналов на входе и выходе различны, то вместо $k_{\text{и}}$ в уравнениях (4.3) и (4.4) используют отношение $\frac{k_{\text{м}}}{T_{\text{и}}}$, в котором $k_{\text{м}}$ — переводный коэффициент для согласования размерностей, а $T_{\text{и}}$ — постоянная времени.

$$T_{\text{и}} \frac{dx(t)}{dt} = k_{\text{м}} \cdot u(t); \quad (4.5)$$

$$x(t) = \frac{k_{\text{м}}}{T_{\text{и}}} \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau.$$

Звено, у которого выходной сигнал пропорционален скорости изменения входного, называют *идеальным дифференцирующим звеном*. Уравнение движения для него

$$x(t) = \Theta \frac{du(t)}{dt}.$$

Коэффициент Θ имеет размерность времени и называется «постоянная времени идеального дифференцирующего звена».

Еще одно идеальное звено носит название «*звено чистого запаздывания*». Сигнал, поступивший на вход этого звена, оказывается на его выходе без изменения через определенный промежуток времени τ . По-

стоянная τ называется постоянной запаздывания. Иногда такое звено называют звеном транспортного запаздывания (рис. 30). Его уравнение движения

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau; \\ u(t - \tau), & t \geq \tau. \end{cases}$$

Кроме идеальных звеньев при анализе САР используют «неидеальные». Это *апериодическое звено*, называемое также «*интегрирующее звено первого порядка*» и «*интегрирующее звено второго порядка*». Модель движения таких звеньев может быть построена путем соединения идеальных интегрирующих и пропорциональных. Однако, учитывая их распространенность и практическую значимость, предпочитают выделять эти звенья в отдельную группу со своими уравнениями движения, что позволяет существенно упростить моделирование САР.

Уравнение движения апериодического звена имеет несколько вариантов записи. Наиболее общую форму имеет такой вариант:

$$T_{\text{ха}} \frac{dx(t)}{dt} + k_{\text{ха}} \cdot x(t) = k_{\text{уа}} \cdot u(t). \quad (4.6)$$

Значения постоянной времени $T_{\text{ха}}$, коэффициентов передачи $k_{\text{ха}}$ и $k_{\text{уа}}$ определяются характеристиками конкретного звена. При $k_{\text{ха}} = 0$ уравнение движения (4.6) превращается в уравнение идеального интегрирующего звена (4.5), при $T_{\text{ха}} \rightarrow 0$ превращается в уравнение безынерционного звена (4.3). Ниже, на примере простого объекта регулирования, мы рассмотрим способы определения постоянной времени и коэффициентов передачи апериодических звеньев.

Уравнение движения интегрирующего звена второго порядка обычно представляют так:

$$T_{\text{ин}}^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2T_{\text{ин}} \xi \frac{dx(t)}{dt} + k_{\text{хин}} \cdot x(t) = k_{\text{уин}} \cdot u(t),$$

где $T_{\text{ин}}$ — постоянная времени; ξ — коэффициент затухания; $k_{\text{хин}}$ и $k_{\text{уин}}$ — коэффициенты передачи.

Закон изменения выхода звена $x(t)$ при известном входном воздействии $u(t)$ называется **переходным процессом**. Часто в качестве характеристики элементарного динамического звена используется **переходная функция** — переходный процесс, возникающий при подаче на вход звена единичного тестового сигнала,

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0. \end{cases}$$

На рис. 32 приводятся вид переходные функции для аperiodического звена при разных значениях коэффициентов передачи. Поведение звена считается устойчивым, если его выходной сигнал стабилизируется с течением времени, то есть производная $\frac{dx(t)}{dt}$ сходится к нулю (рис. 32 а, б) при $t \rightarrow \infty$, и неустойчивым, если выходной сигнал неограниченно возрастает (рис. 32, в, г) при $t \rightarrow \infty$.

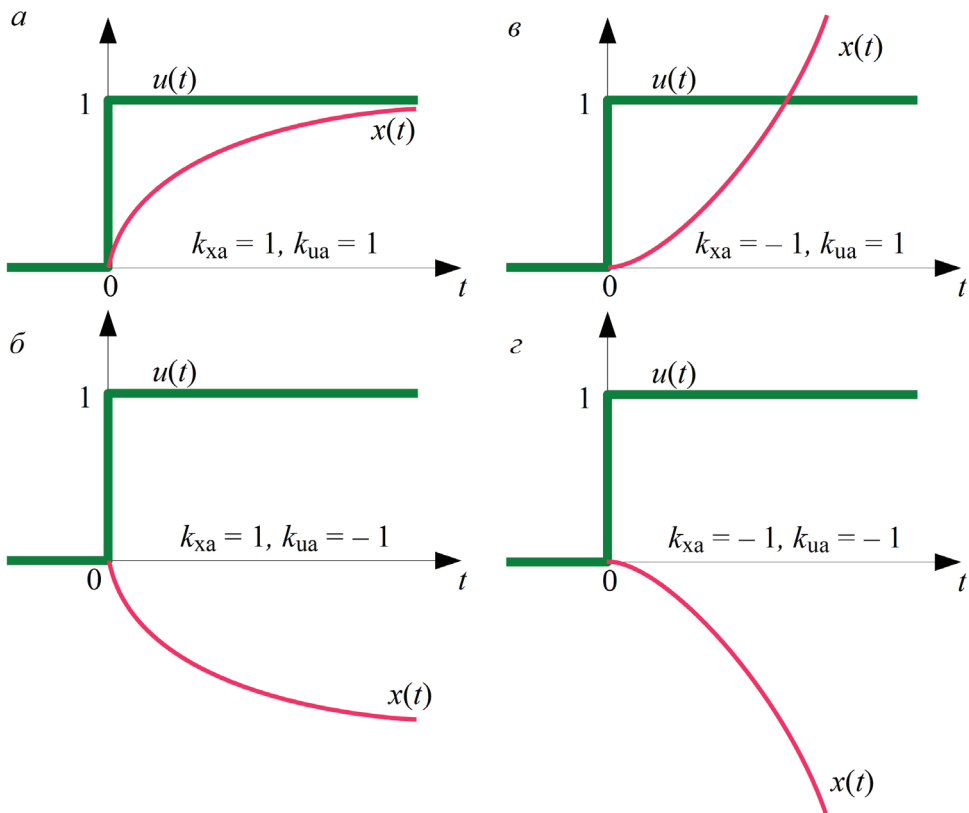


Рис. 32. Переходные функции аperiodического звена:
а, б — устойчивое поведение; в, г — неустойчивое поведение

На рис. 33 показаны примеры переходных функций для интегрирующего звена второго порядка. В зависимости от значения коэффициента затухания ξ возможно несколько вариантов поведения зве-

на. При $\xi > 0$ реализуется затухающий переходный процесс, при $\xi = 0$ консервируются незатухающие колебания и при $\xi < 0$ процесс расходуется с быстро возрастающей амплитудой. Малые значения коэффициента затухания $0 < \xi < 0,5$ приводят к появлению перерегулирования: значение контролируемого параметра выходит (перескакивает) за заданное значение (рис. 33, а). Максимальная величина такого отклонения носит название «динамический заброс». Эффект от такого явления может быть весьма неблагоприятным. При $\xi \geq 1$ звено переходит в устойчивое состояние в отсутствие колебаний (рис. 34). Переходная функция такого звена похожа на переходную функцию апериодического звена (показана пунктирной линией) при одном весьма существенном отличии: начало переходного процесса апериодического звена происходит с разрывом производной, что приведет к ударам при работе механических сочленений; переходный процесс в звене 2-го порядка начинается плавно, без удара.

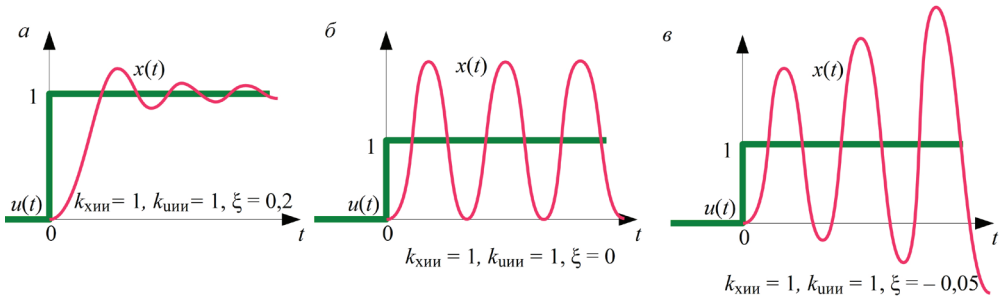


Рис. 33. Переходные функции интегрирующего звена 2-го порядка:

а — устойчивое звено (затухающие колебания); б — колебательное звено (незатухающие колебания); в — неустойчивое звено с возрастающей амплитудой колебаний

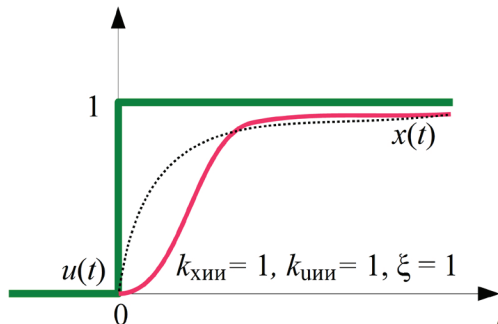


Рис. 34. Устойчивое звено 2-го порядка (сплошная кривая линия) в сравнении с апериодическим звеном (пунктирная линия)

4.3.2. Порядок конструирования уравнения движения

Порядок конструирования уравнения и определения постоянных времени и коэффициентов передачи рассмотрим на примере уравнения движения для широкоиспользуемого в цехах ОМД электродвигателя постоянного тока средней мощности, нагруженного технологической нагрузкой (рис. 35). Объект регулирования — частота вращения вала двигателя ω , управляющее воздействие — ток якоря i , нагрузка — момент прокатки $M_{\text{п}}$.

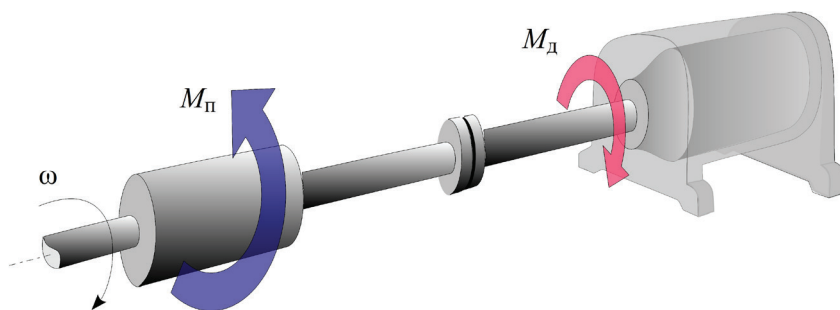


Рис. 35. Схема нагружения электродвигателя

Для упрощения рассуждений, что принципиально не влияет на порядок вывода уравнения, положим, что регулирование осуществляется без изменения магнитного потока. В таком случае момент $M_{\text{д}}$, развиваемый двигателем, будет определяться по величине тока якоря и частоте вращения.

Зависимость момента $M_{\text{д}} = M_{\text{д}}(i, \omega)$ от этих параметров приводится в паспортах двигателей (рис. 36). Обычно известны номинальный момент двигателя $M_{\text{дн}}$ и номинальная частота вращения $\omega_{\text{н}}$ при номинальной величине тока якоря $i_{\text{н}}$. Предположим, что инженеры-прокатчики выбрали двигатель в соответствии номинальным моментом прокатки $M_{\text{пн}}$, то есть $M_{\text{пн}} = M_{\text{дн}}$, и ведут прокатку при номинальной частоте вращения. Для упрощения пренебрежем зависимостью момента прокатки от всех технологических параметров, кроме величины относительного обжатия η , $M_{\text{п}} = M_{\text{п}}(\eta)$. Рассмотрим вывод уравнения движения объекта регулирования при следующих условиях: в начальный момент времени ($t = 0$) система находилась в номинальном состоянии, то есть при номинальной нагрузке ($M_{\text{п}} = M_{\text{пн}}$, $\eta = \eta_{\text{н}}$) и номинальной величине тока $i_{\text{н}}$ двигатель вращался с номинальной

частотой ω_n . В этот момент резко увеличили силу тока i и резко возрос момент M_d , развиваемый двигателем. Частота вращения вала двигателя ω начнет возрастать. Угловое ускорение в соответствии с законами механики будет пропорционально добавке момента

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_{\text{п}}, \quad (4.7)$$

где I — момент инерции вращающихся деталей: якоря двигателя $I_{\text{я}}$, трансмиссии $I_{\text{т}}$, вала $I_{\text{в}}$ и приведенного к валу двигателя момента инерции прокатываемой полосы $I_{\text{пп}}$

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{т}} + I_{\text{в}} + I_{\text{пп}}.$$

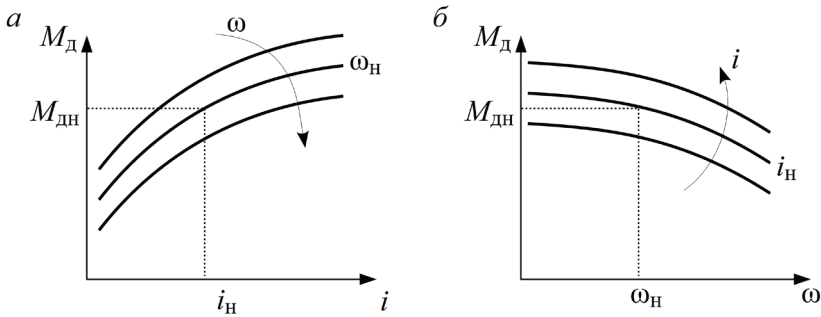


Рис. 36. Зависимость момента двигателя от величины тока i (а) и частоты вращения ω (б)

Зависимость момента двигателя от величины тока и частоты вращения нелинейна (рис. 36). Линеаризуем эту зависимость в окрестности номинальной точки, используя разложение в ряд Тейлора и ограничившись линейной частью разложения,

$$M_d = M_d(i, \omega_n) + \left. \frac{\partial M_d}{\partial i} \right|_{i=i_n, \omega=\omega_n} (i - i_n) + \left. \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \right|_{i=i_n, \omega=\omega_n} (\omega - \omega_n).$$

Аналогично представим момент прокатки:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{п}}(\eta_n) + \left. \frac{\partial M_{\text{п}}}{\partial \eta} \right|_{\eta=\eta_n} (\eta - \eta_n).$$

Учитывая, что $M_{\text{п}}(\eta) = M_{\text{пп}} = M_{\text{дн}} = M_d(i_n, \omega_n)$, уравнение (4.7) можно переписать в виде

$$I \frac{d\omega}{dt} = \left. \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial i} \right|_{\substack{i=i_{\text{н}} \\ \omega=\omega_{\text{н}}}} (i - i_{\text{н}}) + \left. \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega} \right|_{\substack{i=i_{\text{н}} \\ \omega=\omega_{\text{н}}}} (\omega - \omega_{\text{н}}) - \left. \frac{\partial M_{\text{п}}}{\partial \eta} \right|_{\eta=\eta_{\text{н}}} (\eta - \eta_{\text{н}}). \quad (4.8)$$

На следующем шаге осуществим переход к безразмерным величинам. В уравнении (4.8) оставим размерным только время t , поскольку регулирование и управление всегда осуществляются в реальном времени. Характерными величинами для перевода выберем номинальные значения $M_{\text{дн}}$, $i_{\text{н}}$, $\omega_{\text{н}}$, и $\eta_{\text{н}}$.

$$\frac{I}{M_{\text{дн}}} \frac{d\omega}{dt} = \left. \frac{\partial \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{дн}}}}{\partial \frac{i - i_{\text{н}}}{i_{\text{н}}}} \right|_{\substack{i=i_{\text{н}} \\ \omega=\omega_{\text{н}}}} \frac{i - i_{\text{н}}}{i_{\text{н}}} + \left. \frac{\partial \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{дн}}}}{\partial \frac{\omega - \omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}} \right|_{\substack{i=i_{\text{н}} \\ \omega=\omega_{\text{н}}}} \frac{\omega - \omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} - \left. \frac{\partial \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{дн}}}}{\partial \frac{\eta - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}} \right|_{\eta=\eta_{\text{н}}} \frac{\eta - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}.$$

При переходе к безразмерным величинам воспользовались линейностью производных и дифференциалов, а также тем обстоятельством, что дифференциал от константы равен нулю, например, $\partial(i - i_{\text{н}}) = \partial i$. Левую часть уравнения, воспользовавшись свойствами дифференци-

ала, представим в виде $\frac{I}{M_{\text{дн}}} \frac{d\omega}{dt} = \frac{I \omega_{\text{н}}}{M_{\text{дн}}} \frac{d \frac{\omega - \omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}}{dt}$. Учитывая физический

смысл и размерность переменных, введем обозначения: $\bar{M}_{\text{д}}$ — момент двигателя в безразмерном виде, $\bar{M}_{\text{д}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{дн}}}$; $\bar{M}_{\text{п}}$ — момент прокатки

в безразмерном виде, $\bar{M}_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{дн}}}$; T — постоянная времени, $T = \frac{I \omega_{\text{н}}}{M_{\text{дн}}}$;

x — выход звена (контролируемый параметр в безразмерной форме), $x = \frac{\omega - \omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}$, $x = 0$ при $\omega = \omega_{\text{н}}$; u — управляющее воздействие, $u = \frac{i - i_{\text{н}}}{i_{\text{н}}}$,

$u = 0$ при $i = i_{\text{н}}$; и, наконец, f — величина нагрузки, приведенная к безразмерному виду, $f = \frac{\eta - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$, $f = 0$ при $\eta = \eta_{\text{н}}$. После подстановки вве-

денных обозначений уравнение движения будет выглядеть значительно проще:

$$T \frac{dx}{dt} = \left. \frac{\partial \bar{M}_{\text{д}}}{\partial u} \right|_{\substack{u=0 \\ x=0}} u + \left. \frac{\partial \bar{M}_{\text{д}}}{\partial x} \right|_{\substack{u=0 \\ x=0}} x - \left. \frac{\partial \bar{M}_{\text{д}}}{\partial f} \right|_{f=0} f. \quad (4.9)$$

Обозначив числовые значения частных производных из правой части уравнения, вычисленные в рабочей точке, новыми переменными, представим уравнение (4.9) в окончательном виде:

$$T \frac{dx}{dt} - k_x x = k_u u - k_f f. \quad (4.10)$$

Сравните результат с выражением (4.6). Если положить, что относительное обжатие постоянно и равно номинальному, то $f=0$ и в правой части (4.10) останется только слагаемое, содержащее управляющее воздействие, — относительное отклонение величины тока якоря от номинального значения

$$T \frac{dx}{dt} - k_x x = k_u u. \quad (4.11)$$

Если положить, что изменяется только величина нагрузки, а ток якоря остается постоянным и равным номинальному, то уравнение движения будет содержать в правой части влияние изменения нагрузки

$$T \frac{dx}{dt} - k_x x = -k_f f.$$

Таким образом, рассматриваемый объект — электродвигатель с технологической нагрузкой — представляется двумя апериодическими звеньями (рис. 37). Коэффициенты k_u и k_f называются соответственно коэффициентом передачи по управлению и коэффициент передачи по нагрузке. В зависимости от конструкции машины постоянная времени T , коэффициенты передачи k_u и k_f могут изменяться в широком диапазоне значений.



Рис. 37. Эквивалентная схема электродвигателя с технологической нагрузкой

Конструируют уравнения движения обычно в следующем порядке:

- выявляется физический закон, определяющий изменение состояния (движение) моделируемого элемента. Это могут быть уравнения равновесия, баланса, законы сохранения импульса, энергии, массы;

- по паспортным данным, результатам исследований и измерений определяют параметры объекта, исходя из паспортных номинальных режимов выбирают рабочую точку;
- линеаризуют характеристики и уравнения в окрестности рабочей точки;
- выбирают характерные точки и приводят линеаризованные уравнения к безразмерному виду;
- вводят упрощенные обозначения для обобщенных числовых характеристик.

Коэффициенты и постоянные времени таких упрощенных уравнений могут быть определены двумя способами: аналитическим и экспериментальным.

Для аналитического метода необходим большой объем исходной информации. Так, в частности, для определения постоянной времени в уравнении (4.10) $T = \frac{I_{\omega_n}}{M_{дн}}$, нужно осуществить расчет момента инер-

ции I исходя из конструкции звена. Это потребует знания размеров, формы и массы деталей — элементов, из которых состоит динамическое звено, а также номинальной частоты вращения и номинального момента — паспортных характеристик двигателя. Если есть элементы, изменяющие передаваемый сигнал, то для них необходимо получить параметры этих преобразований: передаточные числа редукторов механических узлов, соотношения количества витков катушек при трансформаторных связях, отношение скоростей распространения сигналов при переходе из одной среды в другую, функциональные зависимости параметров. Например, при определении коэффициентов

передачи $k_x = \left. \frac{\partial \bar{M}_д}{\partial x} \right|_{x=0}$ и $k_u = \left. \frac{\partial \bar{M}_д}{\partial u} \right|_{u=0}$, чтобы вычислить частные произ-

водные, нужно иметь формулу, аппроксимирующую характеристику двигателя в окрестности рабочей точки $\bar{M}_д = \bar{M}_д(u, x)$. Необходимые для этого данные, как правило, можно отыскать в современной литературе, например, в инженерных справочниках машиностроительного, электротехнического, технологического направлений. Таким образом, при аналитическом способе все три апериодического звена константы T , k_x и k_u могут быть определены с точностью, определяемой точностью исходных данных.

Другой подход — экспериментальный. Для экспериментального метода потребуются установки и приборы, а кроме того, общие представления о переходных процессах и переходной функции. Рассмотрим, как экспериментально определяют постоянные и коэффициенты передачи на примере идентификации уравнения (4.10).

Положим, что нам удалось в лабораторных условиях гарантировать постоянную нагрузку, равную номинальной ($f=0$). В таком случае при известном законе изменения $u(t) = u^x(t)$, решая дифференциальное уравнение (4.11), можно найти зависимость для относительного приращения частоты вращения $x(t) = \frac{\omega(t) - \omega_n}{\omega_n} = x(t, T, k_x, k_u, i_n, \omega_n)$, в кото-

рую войдут две константы из паспортных данных i_n и ω_n , неизвестные постоянная времени и коэффициенты передачи. Устанавливая ток якоря i в соответствии с законом $u^x(t)$, $i^x(t) = i_n (u^x(t) + 1)$ и регистрируя частоту вращения вала $\omega^x(t)$, найдем зависимость $x^x(t) = \frac{\omega^x(t) - \omega_n}{\omega_n}$. Осу-

ществляя перебор значений коэффициентов передачи и постоянной времени, найдем такие T^x , k_x^x , k_u^x , при которых будет обеспечен минимум нормы $\|x(t) - x^x(t)\|$. Однако нужно помнить, что найденные значения соответствуют закону изменения управления $u(t) = u^x(t)$ и могут оказаться другими при ином виде $u(t)$. На практике часто используют двухточечные грубые оценки для релейной функции управления $u^x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0. \end{cases}$ В этом случае уравнение (4.11) — уравнение с разделя-

ющимися переменными $dx = \frac{k_x \cdot dt}{T} \left(x + \frac{k_u}{k_x} \right) \rightarrow \frac{d \left(x + \frac{k_u}{k_x} \right)}{x + \frac{k_u}{k_x}} = \frac{k_x dt}{T}$ и может

быть решено аналитически:

$$\ln \left(x + \frac{k_u}{k_x} \right) = \frac{k_x t}{T} + \ln C;$$

$$x(t) = C \exp \frac{k_x t}{T} - \frac{k_u}{k_x}.$$

Учитывая, что при $t = 0$ $x(t) = 0$, находим, что постоянная интегрирования $C = \frac{k_u}{k_x}$, и окончательно имеем

$$x(t) = \frac{k_u}{k_x} \left(e^{\frac{k_x t}{T}} - 1 \right). \quad (4.12)$$

Обратив внимание на вид функции управления $u(t)$ и вспомнив определение переходной функции, обнаруживаем, что нами получена переходная функция (4.12) для элементарного динамического звена, описываемого уравнением движения (4.11). Присматриваясь к формуле (4.12), нетрудно заметить, что движение будет устойчивым, лишь если $k_x < 0$ (рис. 38).

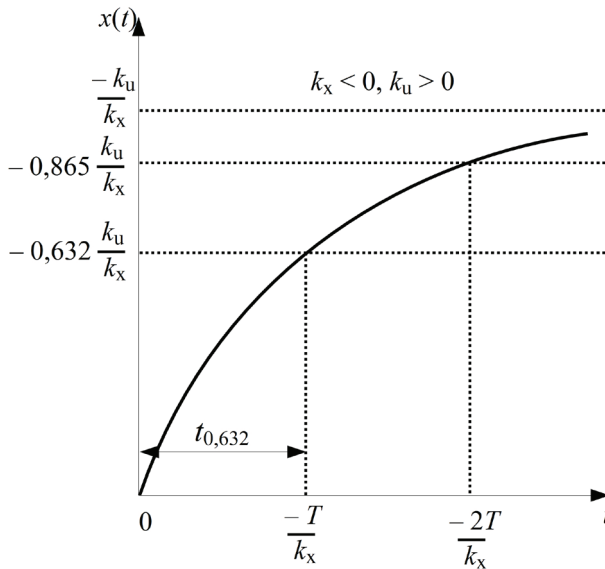


Рис. 38. Двухточечная схема экспериментального определения констант апериодического звена

В таком случае при $t \rightarrow \infty$ $x(t) \rightarrow -\frac{k_u}{k_x}$, то есть, измерив частоту вращения в установившемся режиме $\omega(t) = \omega_{уст}$, удастся найти только отношение $\frac{k_u}{k_x} = \frac{\omega_n - \omega_{уст}}{\omega_n}$. Засекая с помощью точного секундомера момент времени $t_{0,632}$, когда $x(t) = -0,632 \frac{k_u}{k_x}$, можно также найти оценку

постоянной времени $\frac{T}{k_x} = -t_{0,632}$. Однако, в отличие от аналитического

метода, из-за линейности уравнения (4.11) экспериментом нельзя независимо определить все константы T , k_x и k_u . Поэтому уравнение движения (4.11) часто представляют в другой форме.

Поделив левую и правую части уравнения (4.11) на абсолютную величину коэффициента передачи k_x и вводя обозначения $\mathbf{T} = \frac{T}{|k_x|}$ и $\mathbf{k} = \frac{k_u}{|k_x|}$,

уравнение (4.11) переписывают в виде

$$\mathbf{T} \cdot \frac{dx}{dt} \pm x = \mathbf{k}u. \quad (4.13)$$

Знак «+» в выражении (4.13) выбирается при $k_x < 0$. В рассматриваемом случае это соответствует уменьшению момента при возрастании частоты вращения. Знак «-» соответствует случаю $k_x > 0$, когда, например, с ростом частоты увеличивается и вызывающий этот рост момент. Система как бы сама себя разгоняет, подхлестывает, что может привести к аварийной ситуации, практиками называемой «разнос».

Аналогично конструируются уравнения движения и находятся константы для более сложного интегрирующего звена второго порядка. Примером может служить вывод уравнения движения для пружинно-маятника в среде с сопротивлением, рассматриваемый в разделах «Механика» и «Динамика» физических дисциплин.

4.3.3. Передаточная функция

Рассматривая вывод уравнения движения для одного элементарного динамического звена, нетрудно заключить, что при анализе соединения звеньев вывод усложнится многократно. Получение переходной функции соединения путем решения систем дифференциальных уравнений окажется весьма и весьма трудоемким. Для анализа движения и устойчивости сложных систем автоматического регулирования используют аппарат передаточных функций и амплитудно-частотных характеристик. Передаточные функции конструируются с использованием базовых понятий операционного исчисления — оригинала и изображения. Ряд функций вещественных переменных может быть ото-

бражен на пространство комплексной переменной с использованием интегральных преобразований. В теории САР для такого отображения обычно используется интегральное преобразование Лапласа

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt, \quad (4.14)$$

которое ставит в соответствие функцию $F(s)$ комплексного переменного s функции вещественного переменного $f(t)$. Функцию $F(s)$ называют *изображением* по Лапласу. Вместо полной записи формулу (4.14) часто используют символическую

$$F(s) = L[f(t)], \quad (4.15)$$

где L — оператор Лапласа.

Преобразование Лапласа применимо к функциям $f(t)$, которые обладают следующими свойствами:

- $f(t)$ определена и кусочно-дифференцируема на всей положительной числовой полуоси $[0, \infty]$;
- $f(t) \equiv 0$ при $t < 0$;
- существуют такие положительные числа M и c , что $|f(t)| \leq M \cdot e^{ct}$, $0 \leq t < \infty$.

Функции, обладающие этими свойствами, называются **функциями-оригиналами**. Практически все функции, встречающиеся при анализе САР, удовлетворяют перечисленным требованиям. Кроме того, основанием для широкого использования преобразования Лапласа в теории САР служат девять свойств, позволяющих находить изображения без сложных вычислений интеграла (4.14):

- 1) линейность преобразования $L[\alpha_1 f_1(t) + \alpha_2 f_2(t)] = \alpha_1 L[f_1(t)] + \alpha_2 L[f_2(t)]$;
- 2) свертке оригиналов $L\left[\int_0^t f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau\right] = L[f_1(t)] L[f_2(t)]$ соответствует обычное произведение изображений;
- 3) интегрированию оригиналов соответствует деление изображения на комплексную переменную $L\left[\int_0^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{1}{s} L[f(t)] = \frac{1}{s} F(s)$;

- 4) дифференцированию оригиналов соответствует умножение изображения на комплексную переменную $L\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n \cdot F(s) - s^{n-1} \cdot f(0) - s^{n-2} \cdot f_1(0) - \dots - s \cdot f^{n-2}(0) - f^{n-1}(0)$, или, при нулевых начальных условиях, $L\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n \cdot F(s)$;
- 5) преобразование оригинала с запаздыванием сводится к умножению изображения на простую экспоненту $L[f(t - \tau)] = e^{-\tau s} L[f(t)]$;
- 6) при $\alpha > 0$ имеет место правило подобия $L[f(\alpha t)] = \frac{1}{\alpha} \cdot F\left(\frac{s}{\alpha}\right)$;
- 7) умножение оригинала на $e^{-\lambda t}$ равносильно смещению комплексного аргумента на величину λ : $L[e^{-\lambda t} f(t)] = F(s + \lambda)$;
- 8) умножение оригинала на t^n приводит к n -кратному дифференцированию изображения со знаком, определяемым степенью n , $L[t^n f(t)] = (-1)^n \frac{d^n F(s)}{ds^n}$;
- 9) деление оригинала на t соответствует интегрированию изображения в пределах от s до ∞ : $L\left[\frac{1}{t} f(t)\right] = \int_s^\infty F(q) dq$.

Благодаря этим свойствам можно конструировать изображения, отталкиваясь от простейших представлений. Например, получив изображение для единичной функции $1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$: $L[1(t)] = \int_0^\infty e^{-st} 1(t) dt = \frac{1}{s}$, можно, воспользовавшись 5-м свойством преобразования Лапласа, найти изображение функции $e^{-\alpha t}$ $L[e^{-\alpha t}] = L[e^{-\alpha t} 1(t)] = F(s + \alpha) = \frac{1}{s + \alpha}$ или, воспользовавшись правилом умножения 8, найти изображение функции t^n $L[t^n] = L[t^n 1(t)] = (-1)^n \cdot \frac{d^n}{ds^n} \left(\frac{1}{s}\right) = \frac{n!}{s^{n+1}}$. Особенно важно для нас правило дифференцирования 4, позволяющее заменить решение системы дифференциальных уравнений в вещественных переменных решением системы алгебраических уравнений комплексных переменных и последующим обратным переходом от изображений к оригиналам.

Обратный переход к оригиналу осуществляется с помощью интегрирования

$$f(t) = \int_{p-i\infty}^{p+i\infty} e^{st} F(s) ds, \quad (4.16)$$

которое может быть осуществлено вдоль любой прямой p , параллельной мнимой оси. Символически обратное преобразование представляют подобно (4.15)

$$f(t) = L^{-1}[F(s)]$$

и называют обратным преобразованием Лапласа. Интеграл (4.16) вычисляется достаточно сложно для произвольных изображений, однако существует много справочников, в которых приводятся результаты как прямого, так и обратного преобразований Лапласа [9].

Ниже приведены преобразования Лапласа для функций-оригиналов, наиболее часто встречающихся при анализе систем автоматического регулирования. Эти данные могут быть использованы как для прямого, так и для обратного преобразований:

$f(t)$	$1(t)$	t	t^n	$e^{\alpha t}$	$\sin \beta t$	$\cos \beta t$	$e^{\alpha t} \sin \beta t$	$e^{\alpha t} \cos \beta t$
$F(s)$	$\frac{1}{s}$	$\frac{1}{s^2}$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$	$\frac{1}{s-\alpha}$	$\frac{\beta}{s^2 + \beta^2}$	$\frac{s}{s^2 + \beta^2}$	$\frac{\beta}{(s-\alpha)^2 + \beta^2}$	$\frac{s-\alpha}{(s-\alpha)^2 + \beta^2}$

При анализе систем особый интерес представляют обратные преобразования дробно-рациональных функций, разлагаемых на элементарные дроби. Например, обратное преобразование дроби $\frac{1}{s(s+\alpha)}$, $\alpha \neq 0$,

реализуется следующим образом с использованием уже найденного изображения единичной функции и теоремы смещения:

$$L^{-1}\left[\frac{1}{s(s+\alpha)}\right] = L^{-1}\left[\frac{1}{\alpha s} - \frac{1}{\alpha(s+\alpha)}\right] = \frac{1}{\alpha} \left(L^{-1}\left[\frac{1}{s}\right] - L^{-1}\left[\frac{1}{s+\alpha}\right] \right) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}).$$

Похож результат на формулу (4.12), не так ли?

На базе преобразований Лапласа строится аппарат передаточных функций элементарных динамических звеньев. **Передаточной функцией элементарного динамического звена** по Лапласу называют отношение изображения выходного процесса к изображению входного процесса

этого звена при нулевых начальных условиях. Например, передаточная функция $W(s)$ для звена на рис. 31 в общем виде будет записана так:

$$W(s) = \frac{L[x(t)]}{L[u(t)]} = \frac{X(s)}{U(s)},$$

где строчными латинскими буквами обозначены оригиналы-функции, а прописными — их изображения.

Используя свойства преобразования Лапласа, получим передаточные функции элементарных динамических звеньев. Для этого уравнения движения динамических звеньев представим в изображениях:

- идеального безынерционного звена

$$L[x(t)] = k_n \cdot L[u(t)] \Rightarrow X(s) = k_n \cdot U(s),$$

откуда по определению передаточной функции сразу следует $W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = k_n$, то есть для этого звена передаточная функция

численно равна коэффициенту передачи;

- идеального интегрирующего звена

$$L\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = k_n \cdot L[u(t)] \Rightarrow s \cdot X(s) - x(0) = k_n \cdot U(s).$$

Учитывая, что $x(0) = 0$ и $k_n = \frac{k_m}{T_n}$, запишем передаточную функцию

для идеального интегрирующего звена $W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{T_n s}$.

При безразмерном представлении входного и выходного процессов $k_m = 1$ передаточная функция упрощается до $W(s) = \frac{1}{T_n s}$;

- идеального дифференцирующего звена

$$L[x(t)] = \Theta L\left[\frac{du(t)}{dt}\right] \Rightarrow X(s) = \Theta(s \cdot U(s) - u(0)).$$

При нулевых начальных условиях передаточная функция этого звена $W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \Theta s$;

- звена чистого запаздывания

$$L[x(t)] = L\left[\begin{array}{l} 0, \quad t < \tau; \\ u(t - \tau), \quad t \geq \tau \end{array} \right] \Rightarrow X(s) = e^{-s\tau} \cdot U(s) \text{ и } W(s) = e^{-s\tau};$$

- аperiodического звена

$$T_{\text{ха}} L\left[\frac{dx(t)}{dt} \right] + k_{\text{ха}} L[x(t)] = k_{\text{уа}} L[u(t)] = T_{\text{ха}} s \cdot X(s) + k_{\text{ха}} \cdot X(s) = k_{\text{уа}} \cdot U(s),$$

откуда после простых преобразований при нулевых начальных условиях имеем $W(s) = \frac{k_{\text{уа}}}{T_{\text{ха}} s + k_{\text{ха}}}$. Поделив числитель и знамена-

тель на $k_{\text{ха}}$ и введя обозначения $T_a = \frac{T_{\text{ха}}}{|k_{\text{ха}}|}$, $k_a = \frac{k_{\text{уа}}}{|k_{\text{ха}}|}$, получим вариант передаточной функции для двухточечного представления $W(s) = \frac{k_a}{T_a s \pm 1}$;

- интегрирующего звена 2-го порядка

$$T_{\text{ии}}^2 L\left[\frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right] + 2T_{\text{ии}} \xi L\left[\frac{dx(t)}{dt} \right] + k_{\text{хии}} L[x(t)] = k_{\text{уии}} L[u(t)],$$

которое имеет передаточную функцию $W(s) = \frac{k_{\text{уии}}}{T_{\text{ии}}^2 s^2 + 2T_{\text{ии}} \xi s + k_{\text{хии}}}$.

Используя передаточные функции элементарных динамических звеньев, можно сконструировать передаточные функции любого соединения звеньев. Правила получения передаточных функций соединений звеньев иногда называют *алгеброй передаточных функций*.

Рассмотрим некоторые из этих правил. Для упрощения записи будем опускать аргумент s , подразумевая, что он всегда присутствует.

Передаточная функция последовательного соединения звеньев (рис. 39, а) $W = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{X(s)}{X_1(s)} \frac{X_1(s)}{U(s)} = W_2 W_1$. Для последовательного со-

единения n звеньев передаточная функция равна произведению передаточных функций отдельных звеньев

$$W = \prod_{i=1}^n W_i.$$

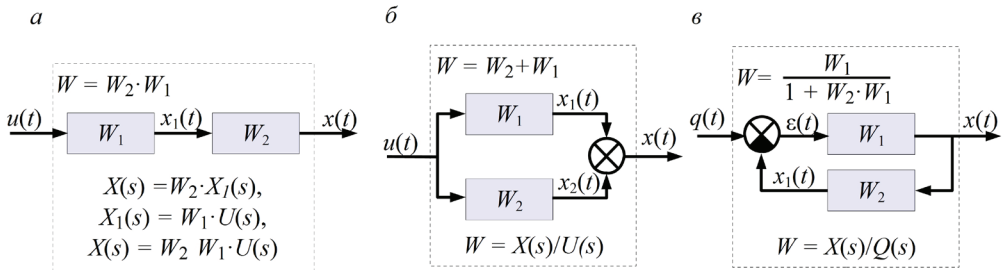


Рис. 39. Передаточные функции соединений звеньев:

а — последовательное соединение; б — параллельное; в — встречное

Передаточная функция параллельного соединения звеньев (рис. 39, б) $W = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{X_1(s)}{U(s)} + \frac{X_2(s)}{U(s)} = W_1 + W_2$. Для параллельного со-

единения n звеньев передаточная функция соединения равна сумме передаточных функций отдельных звеньев

$$W = \sum_{i=1}^n W_i.$$

При анализе динамики появляется еще один тип соединений — встречное (рис. 39, в). При этом соединении значение контролируемого параметра возвращается на вход САР и используется при формировании входного воздействия на объект регулирования. Такая связь выхода объекта регулирования с его входом носит название «обратная связь». Обратная связь может быть положительной — управление и контролируемый параметр складываются, рост контролируемого параметра вызывает возрастание входного воздействия. Если рост контролируемого параметра вызывает уменьшение входного воздействия $\varepsilon(t) = u(t) - x_1(t)$, обратную связь называют отрицательной. На рис. 39, в показано соединение с отрицательной обратной связью. Передаточная функция этого соединения находится в следующей последовательности действий: $X(s) = W_1 \cdot E(s)$, $E(s) = Q(s) - X_1(s)$, $X_1(s) = W_2 \cdot X(s)$, $X(s) = W_1 \cdot (Q(s) - W_2 \cdot X(s))$, $X(s) \cdot (1 + W_1 W_2) = W_1 \cdot Q(s)$ и окончательно

$$W = \frac{X(s)}{Q(s)} = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2}. \quad (4.17)$$

При положительной обратной связи передаточная функция будет отличаться от (4.17) только знаком перед произведением передаточных функций звеньев

$$W = \frac{W_1}{1 - W_1 W_2}.$$

При наличии в функциональной схеме смешанных соединений так же, как в статике, их расчлняют на группы, содержащие только один тип соединения. Каждую группу заменяют новым звеном с передаточной функцией, полученной для группы. Процедуру повторяют до получения одной передаточной функции.

При попытке анализа соединения иногда возникает проблема, связанная с тем, что между двумя звеньями находится сумматор или узел (точка ветвления) (рис. 40, а, б). В этом случае применяют следующие правила:

- при переносе сумматора через звено против направления потока информации вводится фиктивное звено с передаточной функцией, обратной функции звена, через которое осуществляют перенос;
- при переносе сумматора через звено по направлению потока информации вводится фиктивное звено с передаточной функцией, равной функции звена, через которое осуществляют перенос;
- при переносе узла через звено против направления потока информации вводится фиктивное звено с передаточной функцией, равной функции звена, через которое осуществляют перенос;
- при переносе узла через звено по направлению потока информации вводится фиктивное звено с передаточной функцией, обратной функции звена, через которое осуществляют перенос.

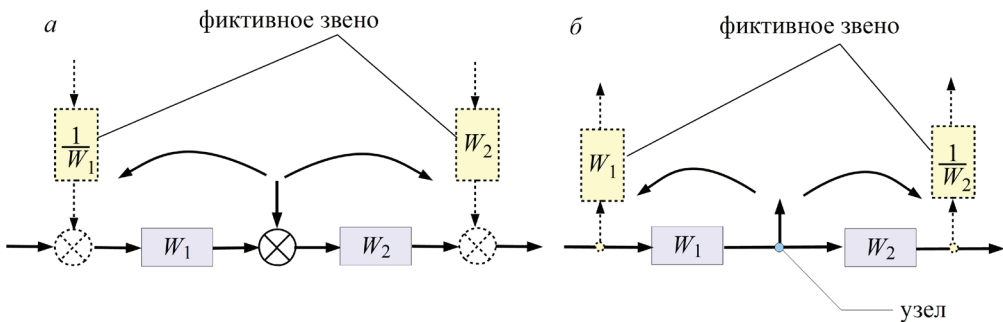


Рис. 40. Перенос сумматора (а) и узла (б)

Используя рассмотренные правила, можно сколь угодно сложную функциональную схему привести к схеме, представленной на рис. 41, содержащей по меньшей мере два важных звена: ОР — объект регулирования и АР — автоматический регулятор с передаточными функциями: передаточной функцией объекта регулирования по нагрузке $W_{\text{орн}}$, объекта регулирования по управлению $W_{\text{ору}}$ и автоматического регулятора $W_{\text{ар}}$. Кроме того, может присутствовать преобразователь с передаточной функцией $W_{\text{пр}}$, обеспечивающий преобразование сигнала настройки $q(t)$ в сигнал $x'(t)$, согласованный с результатом измерения контролируемого параметра. Отклонение контролируемого параметра $x(t)$ от заданного значения в таком случае будет оцениваться по величине $\varepsilon(t) = x'(t) - x(t)$. Автоматический регулятор в зависимости от оценки $\varepsilon(t)$ вырабатывает управляющую команду $u(t)$.

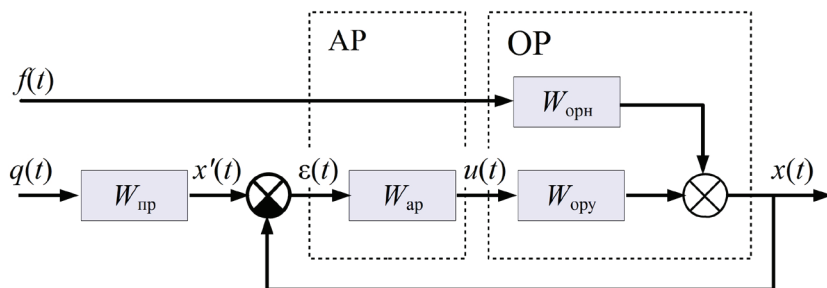


Рис. 41. Расчетная схема САР с отрицательной обратной связью

В зависимости от передаточной функции $W_{\text{ар}}$ регулятора может быть определено несколько законов регулирования:

- пропорциональный закон регулирования $u(t) = k \cdot \varepsilon(t)$; регулятор такого типа называют П-регулятором. Управляющее воздействие такого регулятора будет присутствовать лишь при ненулевом отклонении $\varepsilon(t)$. Говорят, что такой регулятор работает со статической ошибкой. Чем больше порог чувствительности элементов такого регулятора, тем больше ошибка регулирования;
- интегральный закон регулирования — управляющее воздействие пропорционально интегралу от $\varepsilon(t)$: $u(t) = \frac{1}{T_{\text{ар}}} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$. Такой ре-

гулятор называется И-регулятор. Вследствие накопления $\varepsilon(t)$ даже очень малое отклонение может создать значительное управляющее воздействие $u(t)$. Говорят, что такой регулятор работает без

статической ошибки. Однако управление $u(t)$ не исчезает в момент, когда отклонение становится равным нулю и продолжает действовать, вызывая перерегулирование — переход контролируемого параметра через заданное значение. При этом знак $\varepsilon(t)$ меняется и накопление продолжается в обратную сторону. Таким образом, значение контролируемого параметра все время колеблется около заданного значения. При неправильно подобранных постоянных времени перерегулирование может быть большим и отрицательно влиять на качество продукции. Представьте, что так работает регулятор толщины листа при рулонной прокатке. Кроме того, реакция такого регулятора на отклонение может быть медленной — когда еще накопится достаточное значение величины управления $u(t)$, чтобы объект регулирования начал изменять свое состояние;

- дифференциальный закон регулирования — управляющее воздействие пропорционально скорости изменения отклонения $u(t) = \Theta_{\text{ар}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$. Это Д-регулятор. Достоинство такого регулятора

состоит в том, что он обнаруживает уже начало изменения отклонения и очень быстро на него реагирует. Однако как только отклонение перестало изменяться, каким бы большим оно ни было, управляющее воздействие будет отсутствовать.

Из-за недостатков, присущих каждому простому типу регулятора, на практике предпочитают регуляторы, сочетающие достоинства нескольких законов регулирования, в частности, ПИ-регуляторы и ПИД-регуляторы. ПИ-регуляторы быстро реагируют на отклонение из-за наличия пропорциональной части и работают без статической ошибки. У ПИД-регуляторов добавляется быстрая реакция на изменение отклонения с сохранением полезных свойств ПИ-регулятора.

Современная цифровая автоматика в этом отношении является весьма гибкой. Достаточно заложить в основу программы, реализующей регулирование, алгоритм ПИД-регулятора $u(t) = k_{\text{рп}} k_{\text{ар}} \varepsilon(t) + k_{\text{ри}} \frac{1}{T_{\text{ар}}} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + k_{\text{рд}} \Theta_{\text{ар}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ с коэффициентами $k_{\text{рп}}$, $k_{\text{ри}}$ и $k_{\text{рд}}$, равными единице. Вы-

брать другой тип регулятора можно, просто приравнявая некоторые из коэффициентов $k_{\text{рп}}$, $k_{\text{ри}}$ и $k_{\text{рд}}$ нулю. Например, при значениях

$k_{\text{рп}} = 1$, $k_{\text{ри}} = 0$ и $k_{\text{рд}} = 0$ реализуется П-регулятор, а при $k_{\text{рп}} = 1$, $k_{\text{ри}} = 1$ и $k_{\text{рд}} = 0$ — ПИ-регулятор.

Свойства регулятора будут определять переходную функцию системы. Рассмотрим, как зависит переходная функция САР от свойств регулятора и объекта регулирования при номинальной нагрузке, $f(t) \equiv 0$, и $W_{\text{пр}} = 1$, то есть при $x'(t) = q(t)$. Расчетная схема САР для этого случая существенно упрощается (рис. 42). Останутся только два последовательно соединенных звена — автоматический регулятор АР и объект регулирования ОР, охваченных отрицательной обратной связью. Воспользовавшись правилами алгебры передаточных функций, можно заменить последовательно соединенные звенья, регулятор и объект регулирования одним звеном с передаточной функцией $W_1 = W_{\text{ар}} W_{\text{ор}}$.

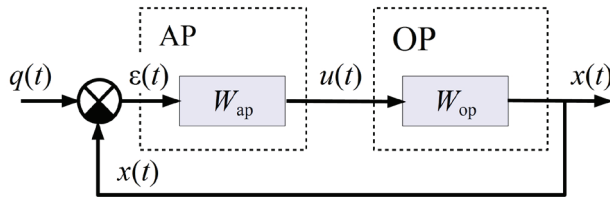


Рис. 42. Расчетная схема САР при номинальной нагрузке и без преобразования сигнала настройки

Добавив в цепь обратной связи фиктивное звено с передаточной функцией $W_2 = 1$, получим соединение (рис. 43), для которого нами уже получена передаточная функция (4.17)

$$W = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2} = \frac{W_{\text{ар}} W_{\text{ор}}}{1 + W_{\text{ар}} W_{\text{ор}}}.$$

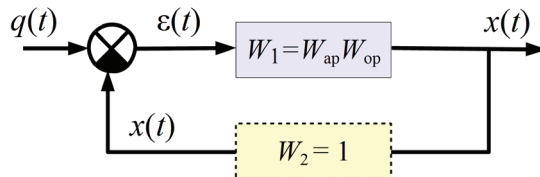


Рис. 43. Эквивалентная схема к рис. 39, в

Подставляя различные передаточные функции для автоматического регулятора и объекта регулирования и используя обратное преоб-

разование Лапласа, найдем переходные функции САР при тестовом сигнале $q(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0; \end{cases}$

- 1) пропорциональный (безынерционный) регулятор с коэффициентом передачи k_{ap} , $W_{ap} = k_{ap}$, и пропорциональный (безынерционный) объект регулирования с коэффициентом передачи k_{op} , $W_{op} = k_{op}$. Передаточная функция САР $W = \frac{k_{ap}k_{op}}{1 + k_{ap}k_{op}} = k_{CAP}$. Си-

стема оказалась безынерционной, и переходную функцию для нее запишем так: $x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ k_{CAP}, & t \geq 0. \end{cases}$ Попытка увеличить коэффи-

циент передачи САР за счет выбора регулятора с большим коэффициентом передачи не приведет к успеху. Наоборот, чем больше $k_{ap}k_{op}$, тем ближе к единице коэффициент передачи системы k_{CAP} .

При положительной обратной связи $W = \frac{k_{ap}k_{op}}{1 - k_{ap}k_{op}} = k_{CAP}$ коэффи-

циент передачи может достигать сколь угодно больших как положительных, так и отрицательных значений, при приближении произведения $k_{ap}k_{op}$ к единице и при $k_{ap}k_{op} = 1$ терпит разрыв. Понятно, что система с таким поведением не может быть устойчивой;

- 2) пропорциональный (безынерционный) регулятор с коэффициентом передачи k_{ap} , $W_{ap} = k_{ap}$, и идеальный интегрирующий объект регулирования с постоянной времени T_{op} , $W_{op} = \frac{1}{T_{op}s}$. Переда-

точная функция этой САР запишется так: $W_{op} = \frac{k_{ap}}{T_{op}s + k_{ap}} = \frac{1}{T_{CAP}s + 1}$,

$T_{CAP} = \frac{T_{op}}{k_{ap}}$. Таким образом, при соединении пропорционального

регулятора и идеального интегрирующего объекта регулирования получается апериодическое звено с постоянной времени в k_{ap} меньше, чем постоянная времени идеального интегрирующего звена. Значит, изменяя коэффициент передачи регулятора, можно существенно влиять на быстродействие получившейся системы. Получить переходную функцию такой САР можно, подав

на вход единичную функцию $q(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ и воспользовавшись

обратным преобразованием Лапласа. Из определения передаточной функции следует $X(s) = W \cdot Q(s)$. Учитывая, что $Q(s) = \frac{1}{s}$, запишем

$$x(t) = L^{-1}[X(s)] = L^{-1}\left[\frac{1}{T_{\text{CAP}}s + 1} \frac{1}{s}\right].$$

Выражение в квадратных скобках можно разложить на сумму дробей, пользуясь методом неопределенных коэффициентов. Разделив числитель и знаменатель первого сомножителя на T_{CAP} и обозначив $\alpha = \frac{1}{T_{\text{CAP}}}$, произведем преобразование $\frac{\alpha}{s + \alpha} \frac{1}{s} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \alpha} = \frac{As + Bs + A\alpha}{s(s + \alpha)}$. Поскольку переменная s может приобретать про-

извольные значения, а в исходном выражении в числителе нет слагаемых, содержащих s , то $A + B = 0$, или $B = -A$. Из $A\alpha = \alpha$ следует, что $A = 1$, тогда $B = -1$. Окончательно получим

$$x(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s} + \frac{1}{s + \alpha}\right] = L^{-1}\left[\frac{1}{s}\right] - L^{-1}\left[\frac{1}{s + \alpha}\right] = 1 - e^{-\alpha t} = 1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{CAP}}}}. \quad (4.18)$$

Из выражения (4.18) следует, что система автоматического регулирования, состоящая из безынерционного регулятора и идеального интегрирующего объекта регулирования, охваченная отрицательной обратной связью, является устойчивой и ее переходная функция сходится к 1 при $t \rightarrow \infty$. При положительной обратной связи $\varepsilon(t) = x(t) + q(t)$ и передаточная функция отличается только знаком перед единицей в знаменателе $W = \frac{1}{T_{\text{CAP}}s - 1}$. Это при-

ведет быстрому экспоненциальному росту контролируемого параметра

$$x(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s - \alpha} - \frac{1}{s}\right] = L^{-1}\left[\frac{1}{s - \alpha}\right] - L^{-1}\left[\frac{1}{s}\right] = e^{\alpha t} - 1 = e^{\frac{t}{T_{\text{CAP}}}} - 1.$$

Такая система неустойчива и будет либо останавливаться, либо идти «вразнос»;

- 3) пусть регулятор и объект регулирования — идеальные интегрирующие звенья с передаточными функциями $W_{\text{ap}} = \frac{1}{T_{\text{ap}}s}$ и $W_{\text{op}} = \frac{1}{T_{\text{op}}s}$.

Передаточная функция САР получится следующей: $W = \frac{1}{T_{\text{ap}} T_{\text{op}} s^2 + 1} = \frac{1}{T_{\text{CAP}}^2 s^2 + 1}$, $T_{\text{CAP}} = \sqrt{T_{\text{ap}} T_{\text{op}}}$. Постоянная времени такой САР равна среднему геометрическому из постоянных времени регулятора и объекта регулирования. Введя обозначение $\beta^2 = \frac{1}{T_{\text{CAP}}^2}$,

запишем передаточную функцию САР как $W = \frac{\beta^2}{s^2 + \beta^2}$. Для полу-

чения переходной функции $x(t) = L^{-1}[X(s)] = L^{-1}\left[\frac{\beta^2}{s^2 + \beta^2} \frac{1}{s}\right]$ снова

воспользуемся разложением выражения в квадратных скобках

на элементарные дроби: $\frac{\beta^2}{s(s^2 + \beta^2)} = \frac{As + B}{s^2 + \beta^2} + \frac{C}{s} = \frac{As^2 + Bs + Cs^2 + C\beta^2}{s(s^2 + \beta^2)} = \frac{(A+C)s^2 + Bs + C\beta^2}{s(s^2 + \beta^2)}$. Поскольку в числите-

ле исходного выражения нет ни s , ни s^2 , то $A + C = 0$, $B = 0$, $C = 1$ и $A = -1$. Применяя обратное преобразование Лапласа к получившейся сумме дробей, получим

$$x(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + \beta^2}\right] = L^{-1}\left[\frac{1}{s}\right] - L^{-1}\left[\frac{s}{s^2 + \beta^2}\right] = 1 - \cos \beta t = 1 - \cos \frac{t}{T_{\text{CAP}}}.$$

Таким образом, при соединении идеального интегрирующего регулятора с таким же объектом регулирования получаем систему, генерирующую незатухающие колебания с амплитудой равной 1 и средним значением тоже равным 1.

Аналогично аналитическими методами моделируют и более сложные системы. Используя аппарат преобразований Лапласа, можно исследовать поведение системы при разных законах регулирования в широком диапазоне изменения параметров системы. Аналитические методы обладают общностью выводов, которые можно распространить на весь класс объектов моделирования.

Используя аналитические методы, мы установили роль обратной связи в САР. Отрицательные обратные связи стабилизируют систему, обеспечивают переход ее в установившееся состояние после изменения входного воздействия. Они используются, когда необходимо поддерживать заданное значение контролируемого параметра при

наличии возмущений, например, для регулирования толщины полосы при прокатке, для поддержания частоты вращения двигателя, для стабилизации потоков жидкости и газа, для стабилизации температуры нагрева и т. п.

Положительная обратная связь, наоборот, выводит систему из устойчивого состояния. Она может быть применена, когда нужно быстро остановить систему или быстро перевести ее в новое состояние. В последнем случае действие положительной обратной связи должно быть прекращено по достижению заданного состояния.

Аналитические методы позволяют анализировать влияние постоянных времени, запаздывания, порога чувствительности, коэффициентов передачи на устойчивость работы оборудования и на качество технологического процесса. Определение величины динамического заброса, коэффициента затухания возможно только при использовании аналитических методов.

Другим подходом при моделировании систем автоматического регулирования является применение численных методов. Результаты, полученные численным моделированием, носят частный характер и не могут быть распространены на другие аналогичные объекты. Они требуют привлечения дополнительных методов для анализа устойчивости, сходимости и корректности используемых алгоритмов. Например, кажущаяся неустойчивость системы может порождаться не свойствами системы, а особенностями алгоритма. Тем не менее, в связи с широким распространением программируемых логических контроллеров для автоматизации процессов и машин обработки металлов давлением, численное моделирование динамических звеньев становится наиболее актуальным. Однако нужно всегда помнить, что ошибки при создании численных моделей могут приводить к неустойчивой работе оборудования, повышенным вибрациям и перегрузкам двигателей.

4.4. Системы автоматического регулирования

В цехах обработки металлов давлением используются самые разнообразные системы автоматического регулирования. Регулирование может осуществляться как через большой набор промежуточных элементов (рис. 44), так и через минимальный вариант, в котором один

элемент выполняет по совместительству функции других элементов системы (рис. 45). На рис. 44 показана большая часть типовой функциональной схемы: объект регулирования — температура, регулирующий орган — трубчатый электрический нагреватель (ТЭН), чувствительный элемент — термодатчик, задатчик — настройка с преобразователем, элемент сравнения — мост, усилитель, регулятор — реостат с сервомеханизмом — двигателем, обеспечивающим через механические связи перемещение ползуна реостата. В системе на рис. 45 отсутствует большинство промежуточных элементов, а датчик температуры, сильфон, выполняет функции элемента сравнения и сервомеханизма, перемещая ползун реостата. Такие САР называют системами прямого действия. И система на рис. 44, и система на рис. 45 относятся к классу замкнутых систем автоматического регулирования. Информационная связь в такой системе замкнута, выход объекта регулирования соединен информационно с его входом. Эта связь может быть разорвана во времени.

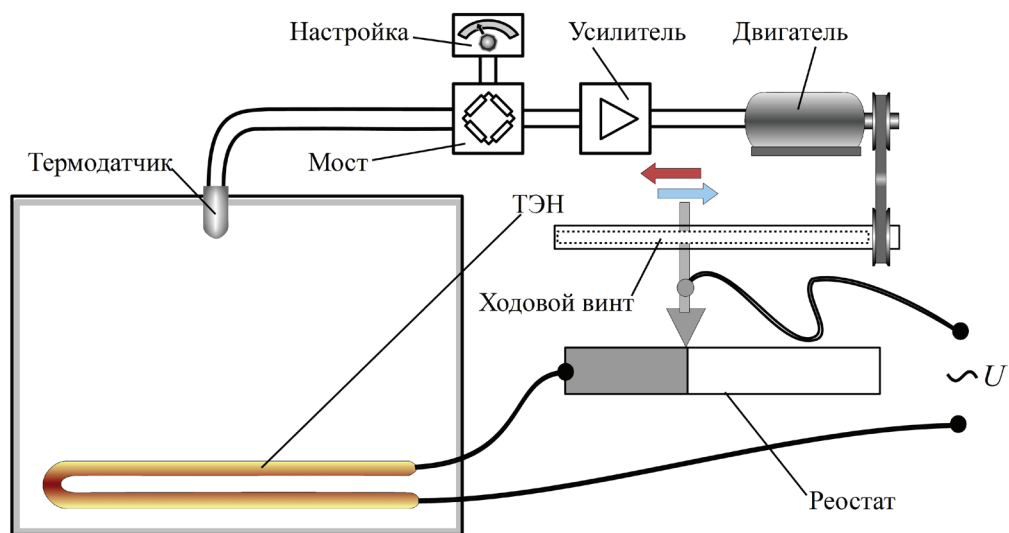


Рис. 44. Регулирование температуры в сушильном шкафу

Собрав и статистически обработав информацию о поведении объекта регулирования, можно создать программу, которая будет в заданные моменты времени изменять управляющие воздействия, не получая информации о текущем состоянии. Такие разомкнутые системы называются системами программного управления. Программа обяза-

тельно должна быть, как принято сейчас, компьютерной, а может быть реализована, например, в виде вала с кулачками, вращаемого часовым механизмом. Кулачки, нажимая рычаги и кнопки, могут реализовать достаточно сложные алгоритмы управления в реальном времени.

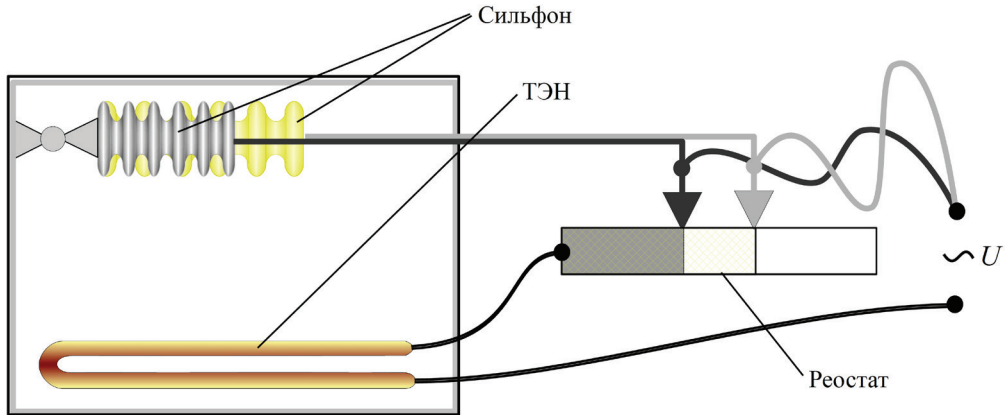


Рис. 45. Регулятор прямого действия

Различают системы непрерывного и дискретного действия. На рис. 44 и 45 системы непрерывного действия. Управляющее воздействие — величина тока через ТЭН — непрерывно изменяется в зависимости от контролируемого параметра. В системе, представленной на рис. 46, терморегулятор на основе биметаллического прерывателя не изменяет величину тока, а только включает или выключает его подачу в нагревательный элемент. Дискретные системы не обеспечивают точной стабилизации контролируемого параметра, но отличаются простотой и дешевизной. Они широко используются в бытовой технике — регулирование температуры в утюгах, электроплитах. Дискретное регулирование может быть реализовано не только в электрических приборах, но и в пневматических, гидравлических системах, например, с помощью клапанов, настроенных на определенное значение давления.

Системы автоматического регулирования могут быть одномерными — регулируется только один параметр, и многомерными — число контролируемых параметров больше одного. Для многомерных САР целесообразно разбиение функциональной схемы на несколько, по одной на каждый контролируемый параметр. Анализ работы системы в этом случае существенно упрощается.

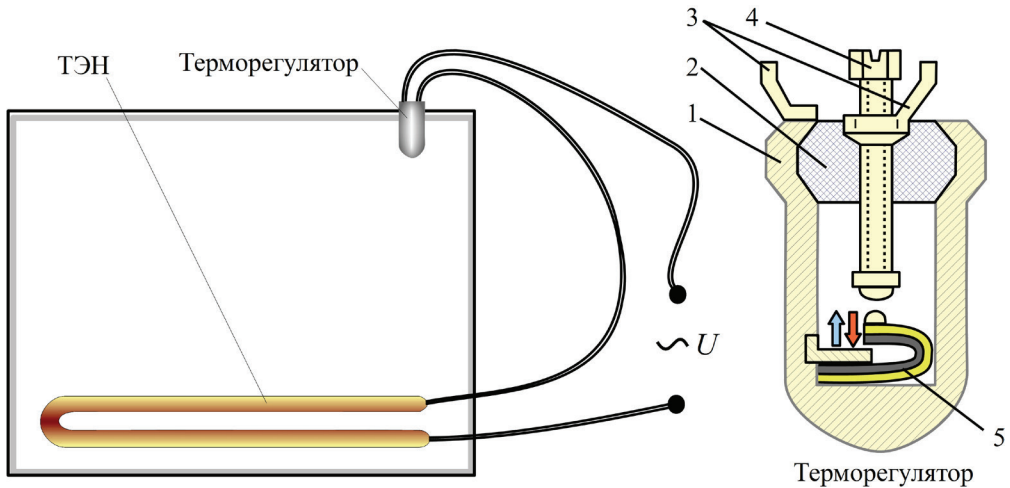


Рис. 46. Дискретная система регулирования температуры:

1 — корпус; 2 — изолятор; 3 — токоподводы; 4 — настройка; 5 — биметаллическая пластина; стрелки — направление изгиба пластины: вверх — при нагреве, вниз — при охлаждении

Срабатывание систем, показанных на рис. 44–46, происходит при отклонении контролируемого параметра от заданного значения. По принципу регулирования такие системы относят к системам Ползунова — Уатта. Их называют системами регулирования по отклонению контролируемого параметра. Другой принцип регулирования используется в разомкнутых системах и сводится к компенсации помехи — возмущения. Системы такого типа называют системами Понселе — Чикалева.

На рис. 47, а иллюстрируется способ компенсации влияния на размеры прокатываемой полосы изменения температуры металла перед прокатным станом. При понижении температуры из-за увеличения сопротивления деформации возрастает давление на валки и за счет упругой деформации клетки увеличивается зазор между валками и соответственно толщина полосы. Информация о температуре металла, полученная пирометром, поступает в компенсатор возмущения. Последний по заложенному алгоритму вычисляет необходимую поправку и выдает команду на исполнительный механизм — нажимное устройство. Двигатель (или гидроцилиндры) нажимного устройства через гайку и нажимной винт изменяет расстояние между валками, компенсируя влияние изменения температуры. Качество компенсации в этом случае полностью определяется алгоритмом, заложенным в систему регулирования. В ал-

горитм должны быть заложены свойства прокатываемого металла, форма и размеры очага деформации, условия на контакте металла с инструментом и другие важные для расчета давления металла на инструмент параметры. Кроме температуры металла, могут приниматься во внимание колебания размеров заготовки. В этом случае система должна быть оснащена дополнительными датчиками, а алгоритм существенно скорректирован. Достоинством такой системы является ее опережающий характер — она работает на упреждение дефекта. Недостаток — сложность реализации и требования к высокой квалификации инженеров-прокатчиков, разрабатывающих алгоритмы.

Система регулирования по отклонению толщины полосы при прокатке показана на рис. 47, б. В этой системе информация о толщине полосы сравнивается с заданным значением и регулятор с помощью нажимного устройства изменяет расстояние между валками в зависимости от обнаруженного отклонения. Недостатком такой системы является то, что она срабатывает с запаздыванием. Чтобы уменьшить величину запаздывания, стремятся приблизить летучий микрометр — измеритель толщины — к раствору валков. При большой инерционности механической и электрической части системы возможно возникновение периодического изменения размера вдоль прокатанной полосы.

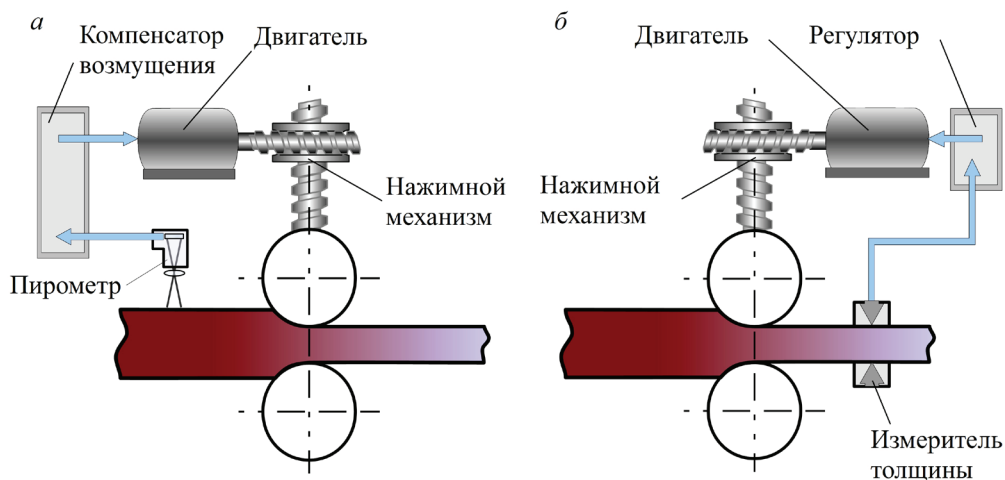


Рис. 47. Регулирование толщины полосы при прокатке по возмущению (а) и по отклонению (б)

Особенностью систем, показанных на рис. 45—47, б является то, что управляющее воздействие возникает только при ненулевом отклоне-

нии контролируемого параметра от заданного значения. Говорят, что такие системы работают с ошибкой. Если в системе автоматического регулирования имеются интегрирующие элементы, то ошибка может быть уменьшена до значения, определяемого порогом чувствительности датчиков. Поэтому по результатам работы САР в установившемся режиме все системы делят на астатические, у которых ошибка определяется только порогом чувствительности элементов (рис. 48, *а*), и статические, работающие со статической ошибкой (рис. 48, *б*).

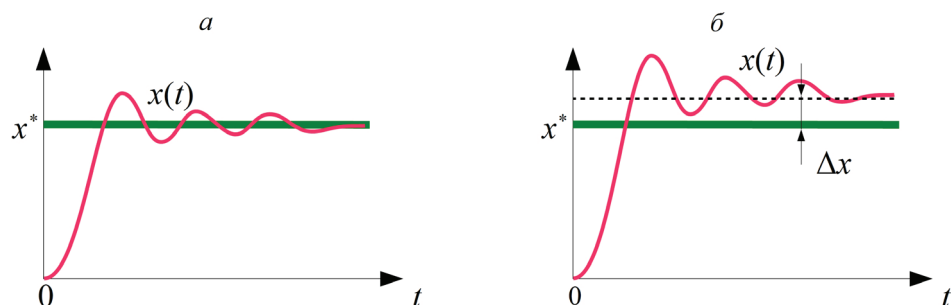


Рис. 48. Переходные процессы в астатической (*а*) и статической (*б*) системах:
 x^* — заданное значение контролируемого параметра; Δx — статическая ошибка

При использовании регуляторов со статической ошибкой нужно корректировать настройку с учетом возможной ошибки. Однако при изменении настройки изменится и величина статической ошибки.

5.

Элементы цифровой автоматики

5.1. Теоретические основы цифровой автоматики

Под термином **цифровая автоматика** понимают ту часть дискретных автоматических (автоматизированных) устройств, в которой используется цифровое представление сигналов при передаче и переработке информации, полученной от датчиков, а также информации о настройках — «уставках». При сопряжении такой автоматики с аналоговыми устройствами обычно используют преобразование сигналов с помощью ЦАП и АЦП. В современных системах основные вычислительные процедуры и реализация управляющих алгоритмов осуществляются программируемыми логическими контроллерами (ПЛК). ПЛК строятся на базе микропроцессорного ядра и по структуре похожи на обычное микропроцессорное вычислительное устройство со всеми его необходимыми составляющими: оперативной и энергонезависимой памятью, развитой системой прерываний, интерфейсами разного типа и назначения. Основное отличие ПЛК от компьютера заключается в расширенных возможностях выполнения логических операций и функций логического управления. Коротко рассмотрим основные термины, которые будут использоваться в дальнейшем изложении.

Логической переменной будем называть переменную, которая может принимать одно из двух альтернативных значений. Набор, содержащий оба альтернативных значения, называют полным, или универсальным, множеством. Это, например, такие множества: $\{0, 1\}$, $\{False, True\}$, $\{\text{«Выключено»}, \text{«Включено»}\}$, $\{\text{«Закрыто»}, \text{«Открыто»}\}$ и тому

подобное. Переменные, принимающие значения из этих множеств, будем обозначать малыми латинскими буквами (x, y, z, \dots) или малыми латинскими буквами с индексами ($x_0, x_1, \dots, x_k, y_0, y_1, \dots$). В системах автоматики логические переменные генерируются двухпозиционными элементами — путевыми выключателями, транзисторами, работающими в режиме ключа, дискретными датчиками, аналого-цифровыми преобразователями. Значения этих переменных могут быть сохранены для обработки путем записи на магнитные, оптические, электронные носители информации. При записи сохраняется альтернативный характер представления переменных. Это, например, два альтернативных направления вектора намагниченности области на магнитном диске или вектора поляризации отраженного от оптического носителя лазерного луча, наличие проводимости или высокого сопротивления элемента в энергонезависимой памяти. При обработке информации из такой записи аппаратными способами сохраненные значения вновь представляются двумя уровнями сигнала электрической или другой природы. В общем случае в цифровых системах принято состояние сигнала представлять множеством $\{0, 1\}$, причем, как правило, 0 соответствует низкому уровню сигнала, а 1 — высокому.

Между логическими переменными могут существовать отношения эквивалентности, обозначаемые знаком равенства « $=$ ». Над переменными установлены три логические операции: *логического сложения (дизъюнкции)*, *логического умножения (конъюнкции)* и *отрицания (инверсии)*. В тех случаях, когда не возникает неопределенности выбора между логическими и арифметическими действиями, например, в документе, не содержащем формул с арифметическими выражениями, будем использовать для логических операций привычные обозначения: « $+$ » для сложения и « \cdot » для умножения. Инверсию будем обозначать знаком « \neg » над символом логической переменной. В тех случаях, когда в документе существуют и арифметические и логические действия, будем использовать « \vee » для дизъюнкции и « \wedge » для конъюнкции. В ряде случаев используются обозначения «ИЛИ» («OR») для логического сложения, «И» («AND») для умножения и «НЕ» («NOT») для отрицания. Результаты каждой из операций (отношения эквивалентности) определены следующими таблицами истинности:

инверсия		дизъюнкция			конъюнкция		
x	$y = \bar{x}$	x_1	x_0	$y = x_1 + x_0$	x_1	x_0	$y = x_1 \cdot x_0$
0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0
		1	0	1	1	0	0
		1	1	1	1	1	1

Из этих отношений однозначно вытекают следующие законы, называемые законами логики.

Закон универсального множества

$$x + 1 = 1;$$

$$x \cdot 1 = 1.$$

Закон нулевого множества

$$x + 0 = x;$$

$$x \cdot 0 = 0.$$

Закон двойного отрицания

$$\bar{\bar{x}} = x.$$

Закон дополнения до полного множества

$$x + \bar{x} = 1;$$

$$x \cdot \bar{x} = 0.$$

Закон двойственности

$$\overline{x_1 + x_0} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_0;$$

$$\overline{x_1 \cdot x_0} = \bar{x}_1 + \bar{x}_0.$$

Закон тавтологии

$$x + x = x;$$

$$x \cdot x = x.$$

Коммутативный (переместительный) закон

$$x_1 + x_0 = x_0 + x_1;$$

$$x_1 \cdot x_0 = x_0 \cdot x_1.$$

Ассоциативный (согласовательный) закон

$$(x_2 + x_1) + x_0 = x_2 + (x_1 + x_0);$$

$$(x_2 \cdot x_1) \cdot x_0 = x_2 \cdot (x_1 \cdot x_0).$$

Дистрибутивный (распределительный) закон

$$x_2 \cdot (x_1 + x_0) = x_2 \cdot x_1 + x_2 \cdot x_0;$$

$$x_2 + (x_1 \cdot x_0) = (x_2 + x_1) \cdot (x_2 + x_0).$$

Закон поглощения (абсорбции)

$$x_1 + x_1 \cdot x_0 = x_1;$$

$$x_1 (x_1 + x_0) = x_1.$$

Закон склеивания

$$x_1 \cdot x_0 + x_1 \cdot \bar{x}_0 = x_1;$$

$$(x_1 + x_0) \cdot (x_1 + \bar{x}_0) = x_1.$$

Обобщенный закон Моргана — Шеннона

$$\overline{x_3 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_0} = (\bar{x}_3 + \bar{x}_2) \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_0).$$

Перечисленные законы позволяют эффективно упрощать сложные логические функции. Отметим, что **логической функцией** называют отображение набора (комбинации) значений логических переменных — аргументов — на универсальное множество. Результатом этой функции является новая логическая переменная. Эту новую логическую переменную иногда называют «переключательной функцией» — ПФ. При n аргументах число наборов $N = 2^n$, а возможное число значений ПФ $M = 2^N = 2^{2^n}$. Набор {«И», «ИЛИ», «НЕ»} называют функционально полным. Любая логическая функция может быть представлена через этот функционально полный набор. Каждая операция из этого набора может быть легко реализована с помощью элементов микроэлектроники, использующих микроэлектронные ключи, например, биполярные транзисторы в режимах насыщения (двойной инжекции) и отсечки или униполярные (полевые) транзисторы. Управление проводимостью биполярного транзистора осуществляется током базы. В отличие от биполярного, в полевом транзисторе проводимостью управляет не ток, а электрическое

поле (отсюда и название «полевой»), создаваемое приложенным напряжением.

Наиболее просто принцип управления информационными сигналами можно пояснить на примере использования полевых МДП-транзисторов (металл-диэлектрик-полупроводник). Поскольку в качестве диэлектрика в таких транзисторах используют оксиды (в частности, двуокись кремния SiO_2), то полевой транзистор с такой структурой называют еще МОП-транзистором (металл-оксид-полупроводник). Структура МОП-транзистора с каналом n -типа показана на рис. 49, а. Области с большим содержанием носителей n -типа (свободных электронов) обозначены на рисунке n^+ . Область с дырочной проводимостью, бедная носителями n -типа, обозначена штриховкой и буквой p . Если между истоком и стоком создать напряжение в соответствии с указанной на рисунке полярностью, а на затвор подать нулевой потенциал (логический «0»), то на пути от истока к стоку окажутся два встречно включенных p - n перехода. Сопротивление между истоком и стоком в данном случае окажется очень большим — транзистор закрыт. При подаче на затвор положительного потенциала выше порогового значения (логическая «1») область под диэлектриком, напротив затвора, обогащается носителями n -типа — электронами. Появляется канал с электронной проводимостью — транзистор открыт.

Состояния транзистора «открыт» и «закрыт» можно условно представить при помощи эквивалентных схем (рис. 49, б). Комбинируя транзисторы и резисторы, можно создать простые цепи, реализующие логические операции «НЕ» (рис. 50), «ИЛИ» (рис. 51) и «И» (рис. 52). Любая схема логического управления может быть последовательно сведена к комбинации элементов, осуществляющих элементарные логические операции.

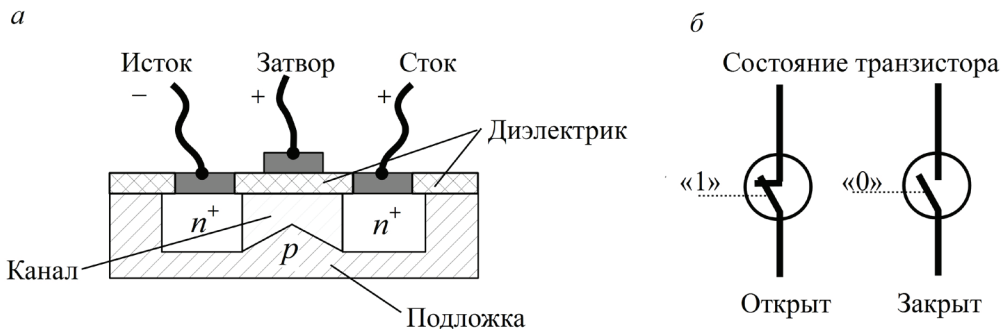


Рис. 49. Структура МОП-транзистора (а) и эквивалентная схема (б)

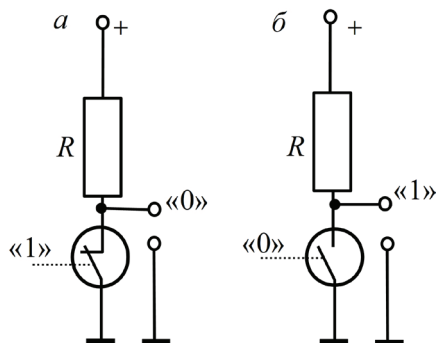


Рис. 50. Реализация операции «НЕ»:
 a — инверсия «1»; $б$ — инверсия «0»

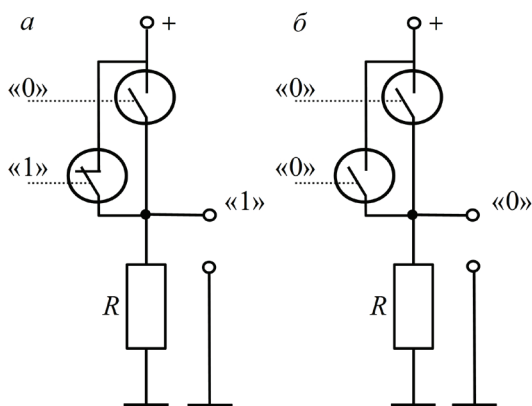


Рис. 51. Реализация операции «ИЛИ»:
 a — «0» + «1»; $б$ — «0» + «0»

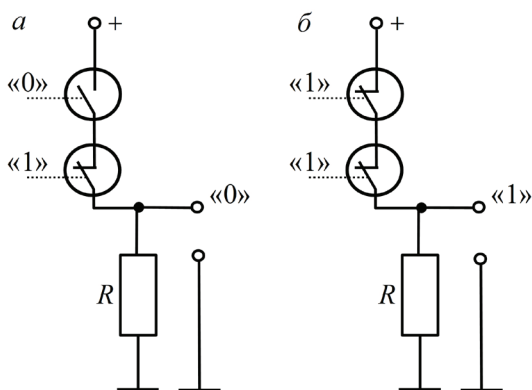


Рис. 52. Реализация операции «И»:
 a — «0» · «1»; $б$ — «1» · «1»

При конструировании аппаратуры обычно используют универсальные сборки из нескольких транзисторов, диодов и резисторов, на которых путем соответствующих соединений можно реализовать все элементарные логические операции, а следовательно, и любые логические функции. Такие сборки называют базовыми логическими элементами (БЛЭ). На практике нашли широкое применение два БЛЭ: И-НЕ (штрих Шеффера) и ИЛИ-НЕ (стрелка Пирса). В первом случае над n входами выполняется операция логического умножения, а результат этой операции инвертируется. При ИЛИ-НЕ над n входами выполняется операция логического сложения и инвертируется результат. Обычно реализуются элементы с двумя, тремя, четырьмя и восемью входами. Нетрудно видеть, что с помощью элемента с n входами можно осуществлять логические действия над любым количеством операндов, не превышающем n . При логическом сложении достаточно соединить свободные входы с логическим «0», при умножении — подать на свободные входы логическую «1». При использовании только одного входа БЛЭ превращается в инвертор. При соединении всех входов вместе тоже получают инвертор с одним входом.

На схемах логического управления используют графические обозначения логических элементов (рис. 53). Обозначение «4 ИЛИ-НЕ» соответствует базовому логическому элементу, осуществляющему дизъюнкцию четырех переменных с последующей инверсией результата, обозначение «4 И-НЕ» — БЛЭ, осуществляющему конъюнкцию четырех аргументов с последующей инверсией.

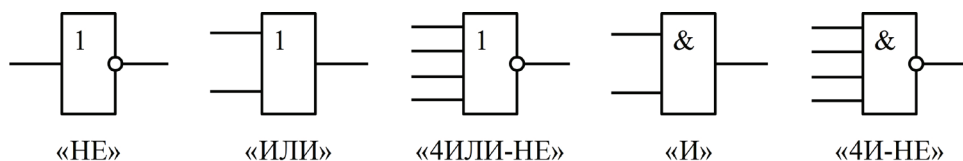


Рис. 53. Примеры условных обозначений логических элементов

Обозначения более сложных сборок могут быть найдены в любом справочнике компонентов электронных схем.

5.2. Представление и упрощение логических функций

5.2.1. Таблицы состояния и нормальные формы

Результат логической операции может быть представлен в виде алгебраического выражения. Благодаря ограниченному числу аргументов и их значений результат логических операций может быть представлен в табличной форме, содержащей все значения аргументов и результатов действий над ними. Такие таблицы называют таблицами состояния.

Таблица состояния в общем случае содержит $n + 1$ столбец (n аргументов плюс один столбец для значений функции) и 2^n строк, не считая заголовка. Аргументы обычно индексируют начиная с нуля. Аргумент с индексом 0 находится в крайнем правом столбце аргументов, аргумент в крайнем левом столбце имеет индекс $n-1$. Например, для функции от четырех аргументов заголовок таблицы будет выглядеть так: $x_3 x_2 x_1 x_0 y$. Строку значений аргументов можно рассматривать как позиционное двоичное число. В таком случае строки значений аргументов нужно размещать в порядке возрастания этого числа от 0 до $2^n - 1$. В качестве примера рассмотрим таблицу состояния функции трех аргументов, заданной логическим выражением:

$$y = (x_2 + \bar{x}_1 + x_0) \cdot (\bar{x}_2 + \bar{x}_1 + x_0). \quad (5.1)$$

В таблице ниже, в первом столбце, обозначенным X_{10} , записано переведенное в десятичную форму позиционное двоичное число, соответствующее строке значений аргументов. Таблица должна содержать четыре столбца и 8 строк, не считая заголовков:

X_{10}	x_2	x_1	x_0	y
0	0	0	0	1
1	0	0	1	1
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	1
5	1	0	1	1
6	1	1	0	0
7	1	1	1	1

Другие способы представления логических функций сводятся к нормальным алгебраическим формам (дизъюнктивной или конъюнктивной) или к графическому представлению в виде карт Карно (Вейча). **Дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ)** — это дизъюнкция всех элементарных конъюнкций, записанных для строк, в которых логическая функция равна 1, **конъюнктивная нормальная форма (КНФ)** — это конъюнкция всех элементарных дизъюнкций тех строк, в которых функция равна 0. Под **элементарной конъюнкцией** понимается логическое произведение всех аргументов, взятых в прямом или инвертированном виде, под **элементарной дизъюнкцией** — логическая сумма всех аргументов, взятых в прямом или инвертированном виде. Инверсия осуществляется таким образом, чтобы и конъюнкция и дизъюнкция давали значение логической функции в данной строке. Таким образом, ДНФ содержит столько слагаемых, сколько ненулевых значений функции, а КНФ содержит столько сомножителей, сколько нулевых значений функции. Нетрудно догадаться, что выражение (5.1) представляет собой конъюнктивную нормальную форму логической функции, представленной в таблице состояния на с. 124. Дизъюнктивная нормальная форма для этой функции может быть представлена дизъюнкцией шести элементарных конъюнкций:

$$y = \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_0 + \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_1 \cdot x_0 + \bar{x}_2 \cdot x_1 \cdot x_0 + x_2 \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_0 + x_2 \cdot \bar{x}_1 \cdot x_0 + x_2 \cdot x_1 \cdot x_0.$$

5.2.2. Карты Карно

В ряде случаев удобно логическую (переключательную) функцию представлять в графической форме в виде карт Карно. Карта Карно представляет собой прямоугольное поле, стороны которого кратны степеням 2, а площадь составляет 2^n единиц.

Поле разбито на клетки, для каждой из них определены координаты в виде значений логических переменных. Для построения карты Карно и расстановки координат клеток можно использовать правило отражения («зеркала»). При этом используется такая последовательность: сначала строится карта для одного аргумента, $n = 1$. Ширина карты составит две единицы, а высота — одну (рис. 54).

$x_0 = 0$	$x_0 = 1$

Рис. 54. Карта Карно для одного аргумента

Для двух аргументов карта может быть получена «отражением» карты для одного элемента (рис. 54) относительно правой или нижней ее грани (рис. 55).

a

$x_1x_0 = 00$	$x_1x_0 = 01$	$x_1x_0 = 11$	$x_1x_0 = 10$

б

	$x_0 = 0$	$x_0 = 1$
$x_1 = 0$		
$x_1 = 1$		

Рис. 55. Карта Карно для двух аргументов:

a — отражение через правую грань; *б* — отражение через нижнюю грань

При отражении новый аргумент приписывается перед существующим, а его значение устанавливается равным 0 до отражения и равным 1 — в отраженной части.

На рис. 56 показана карта Карно для трех аргументов, полученная отражением карты на рис. 55, *б* через нижнюю грань.

	$x_0 = 0$	$x_0 = 1$
$x_2x_1 = 00$		
$x_2x_1 = 01$		
$x_2x_1 = 11$		
$x_2x_1 = 10$		

Рис. 56. Карта Карно для трех аргументов

Координаты клеток карты Карно можно рассматривать как соответствующее сочетание аргументов — n -разрядное позиционное двоичное число. Например, координата верхней левой клетки (рис. 56) может быть представлена так: $x_2 x_1 x_0 = 000$. Координата нижней правой клетки — $x_2 x_1 x_0 = 101$. Если соответствующее такому сочетанию аргументов значение логической функции не равно нулю, то данную клетку заштриховывают, иначе оставляют ее незаштрихованной. На рис. 57 представлена карта Карно для функции (5.1). Незаштрихованные клетки имеют координаты $x_2 x_1 x_0 = 010$ и $x_2 x_1 x_0 = 110$, при которых значение логической функции в таблице на с. 124 равно 0.

	$x_0 = 0$	$x_0 = 1$
$x_2 x_1 = 00$		
$x_2 x_1 = 01$		
$x_2 x_1 = 11$		
$x_2 x_1 = 10$		

Рис. 57. Карта Карно для функции (5.1)

Нет необходимости полностью записывать таблицу состояния для переключательных функций, особенно если велико количество аргументов. Для сокращения записи можно воспользоваться альтернативностью значений логической функции. Достаточно в таблице состояния записать, например, только те строки, в которых значение функции равно 1, тогда в остальных, опущенных, строках логическая функция имеет значение 0. Такая сокращенная таблица состояния называется таблицей Эйкена.

5.2.3. Упрощение логических функций

Схему на логических элементах перед ее реализацией обычно подвергают упрощению. Упрощение логической функции позволяет получить результат с использованием наименьшего возможного количества элементарных операций. Это обеспечивает уменьшение сложности печатной платы и расхода электронных компонентов при реализации

схемы с помощью монтажа, уменьшение числа компонентов при реализации схемы на кристалле или упрощение и повышение надежности программы для ПЛК.

Упрощение может быть осуществлено преобразованием ДНФ или КНФ на основе законов алгебры логики. Как правило, такой подход используется при небольшом количестве аргументов, поскольку он требует неформализованных, а зачастую и интуитивных действий (например, упрощение алгебраических выражений в школьной математике). В более сложных случаях требуется использовать формализованные процедуры упрощения, например, упрощение с помощью анализа карт Карно. В этом случае необходимо определить ряд простых правил.

Основой являются определение «соседних» клеток и «максимального подкуба». Соседними клетками будем называть клетки, координаты которых отличаются только в одной позиции. Так, на рис. 56 клетки с координатами 001 и 011 являются соседними, а клетки с координатами 001 и 010 — несоседними. Соседними по этому определению являются и, казалось бы, далекие друг от друга клетки в верхнем и нижнем рядах карты с координатами 000 и 100, а также 001 и 101. Мы как бы склеили карту верхней и нижней гранью, свернув ее в трубку.

Подкубом карты Карно будем называть составленное из соседних заштрихованных клеток прямоугольное поле, стороны которого кратны степеням 2, а площадь содержит 2^k клеток. Значение k называют порядком подкуба. Порядок не может быть больше числа аргументов n , $k \leq n$. Подкуб нулевого порядка содержит одну заштрихованную клетку, а подкуб порядка n занимает всю карту. В последнем тривиальном случае на карте нет ни одной незаштрихованной клетки.

Максимальным подкубом будем называть подкуб, имеющий на данной карте наибольший возможный порядок, в котором хотя бы одна клетка не принадлежит ранее выделенным максимальным подкубам, то есть подкубы могут иметь не более $2^k - 1$ общих клеток. Например, для карты рис. 58 можно обнаружить два максимальных подкуба второго порядка. Для этой карты на рис. 58 разными контурами обведены максимальные подкубы, состоящие из клеток {000, 001, 101, 100}, — контур 1 и {001, 011, 111, 101} — контур 2.

Правило упрощения с помощью карты Карно формулируется так: дизъюнктивная форма для карты Карно содержит столько конъюнкций, сколько максимальных подкубов можно последовательно выделить на карте. Каждая конъюнкция соответствует одному подкубу

и содержит $n - k$ сомножителей-аргументов. Сомножитель берется в инвертированной форме, если его значение в подкубе равно 0. Из конъюнкции исключаются аргументы, которые в соответствующем подкубе приобретают оба значения — 0 и 1.

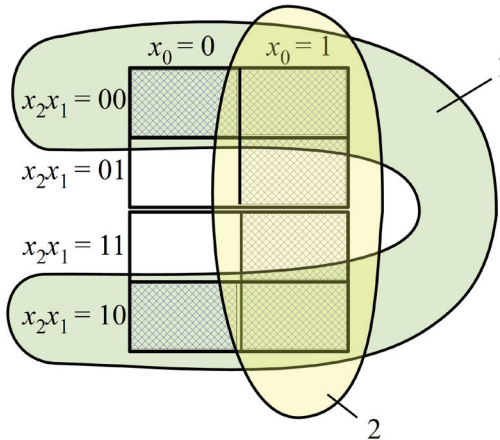


Рис. 58. Выделение максимальных подкубов

Удобно выполнять упрощение в следующем порядке: 1) выделяют и нумеруют подкубы; 2) записывают дизъюнкцию конъюнкций по числу подкубов, составляя конъюнкции из всех аргументов; 3) в каждой конъюнкции вычеркивают аргументы, принимающие в соответствующем подкубе оба значения 0 и 1; 4) инвертируют оставшиеся аргументы, которые в соответствующем подкубе имеют значение 0.

Пример: последовательность упрощения функции (5.1):

шаг 1 — выделение подкубов, $\{000, 001, 101, 100\}$ — первый подкуб 2-го порядка и $\{001, 011, 111, 101\}$ — второй подкуб 2-го порядка;

шаг 2 — $y = x_2 \cdot x_1 \cdot x_0 + x_2 \cdot x_1 \cdot x_0$ — дизъюнкция двух (по числу подкубов) конъюнкций;

шаг 3 — $y = x_2 \cdot x_1 \cdot x_0 + x_2 \cdot x_1 \cdot x_0$ — вычеркивание аргументов, от которых не зависит результат;

шаг 4 — $y = \bar{x}_1 + x_0$ — инвертирование аргумента x_1 , имеющего нулевое значение в подкубе.

5.2.4. Пример логического управления

В современной цифровой автоматике широко используются цифровые индикаторы для вывода информации о настройках и параметрах процессов. Рассмотрим, как на логических элементах обеспечить включение сегментов индикатора (рис. 59) при индикации десятичных цифр. Как следует из постановки задачи, индикатор должен приобретать одно из десяти состояний, в каждом из которых будет включено несколько сегментов.

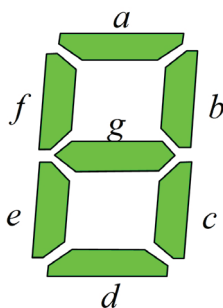


Рис. 59. Семисегментный индикатор

Какие сегменты нужно включить, а какие должны остаться неактивными, зависит от высвечиваемой цифры (рис. 60). Для управления выбором цифры потребуется четырехбитный сигнал, который обеспечит выбор одного из шестнадцати объектов, пронумерованных от 0 до 15. Это значит, что при работе индикатора шесть комбинаций значений битов останутся не востребуемыми, поскольку десятичных цифр всего 10. Однако уменьшить разрядность сигнала невозможно, поскольку число состояний сигнала из трех битов обеспечивает выбор только из восьми вариантов.

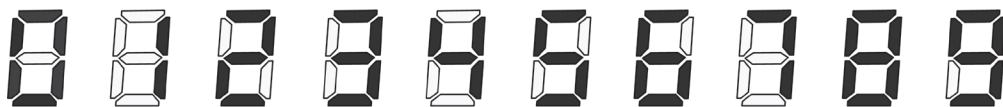


Рис. 60. Индикация десятичных цифр на семисегментном индикаторе

В качестве примера выберем управление сегментом *a*. Этот сегмент остается незасвеченным только при индикации цифр 1 и 4 (рис. 60). Построим логическую функцию, обеспечивающую включение сегмен-

та a при появлении двоичных кодов всех десятичных цифр, кроме 1 и 4, на входе схемы. Для незадействованных комбинаций кодов их шесть, значение логической функции может быть произвольным, поскольку отрабатывать такие значения не нужно. Обычно в этом случае назначают недостающие значения логической функции таким образом, чтобы легче осуществлялось последующее представление логической функции в виде нормальной алгебраической формы. При конструировании нормальных форм (ДНФ и КНФ) стремятся уменьшить количество элементарных дизъюнкций и конъюнкций. Поэтому если в значениях логической функции преобладают нули, то и незадействованные ее значения заполняют нулями, тогда ДНФ будет содержать меньше слагаемых. И наоборот, при преобладании единиц незадействованные значения логической функции тоже заполняют единицами, и КНФ будет иметь меньше сомножителей. В нашем случае преобладающие значения — единицы. Заполнив недостающие значения функции (см. таблицу ниже) единицами, получим всего две строки с нулевым значением логической функции, то есть конъюнктивная нормальная форма этой функции будет содержать всего две элементарные дизъюнкции

$$a = (x_3 + x_2 + x_1 + \bar{x}_0) \cdot (x_3 + \bar{x}_2 + x_1 + x_0).$$

Логическая функция управления сегментом a индикатора:

Цифра	Двоичный код цифры				a
	x_3	x_2	x_1	x_0	
0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	1
3	0	0	1	1	1
4	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1
7	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	1
9	1	0	0	1	1
~	1	0	1	0	1
~	1	0	1	1	1
~	1	1	0	0	1
~	1	1	0	1	1
~	1	1	1	0	1
~	1	1	1	1	1

Схема на логических элементах, которая реализует КНФ, показана на рис. 61.

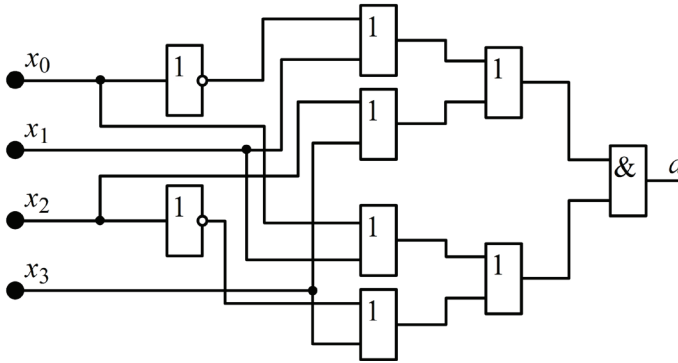


Рис. 61. Реализация КНФ для управления сегментом a

Осуществим упрощение логической функции, используя анализ карты Карно. На рис. 62 приведена карта Карно для логической функции управления сегментом a . На карте выделены два максимальных подкуба третьего порядка (желтый и розовый) и два максимальных подкуба второго порядка (зеленый и голубой).

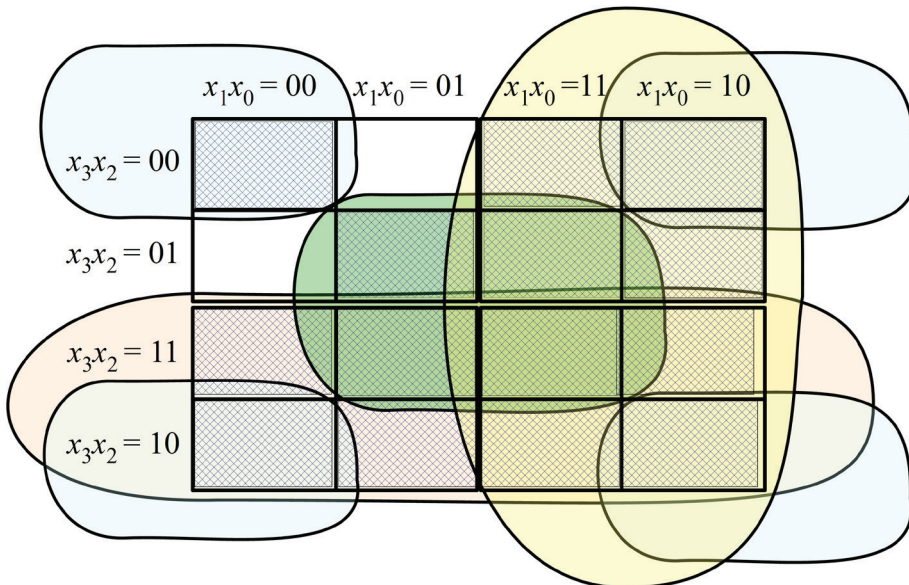


Рис. 62. Карта Карно для функции управления сегментом a

Применив последовательность шагов упрощения 2, 3 и 4, получим логическую функцию $a = x_1 + x_3 + x_2 \cdot x_0 + \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_0$. Схема, реализующая эту функцию с использованием элементарных логических операций, представлена на рис. 63.

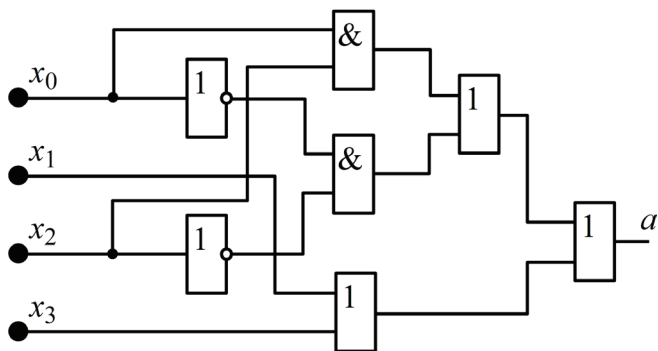


Рис. 63. Схема управления сегментом *a* после упрощения

В сравнении со схемой на рис. 52 наблюдается существенное уменьшение числа элементов и соединений. Кроме того, в соответствии с теоремой двойственности $x_2 \cdot x_0 = x_2 + x_0$. Поэтому два инвертора и одну схему логического умножения можно заменить одним БЛЭ «ИЛИ-НЕ». Это еще более упростит управление сегментом.

5.3. Арифметические операции с двоичными числами

Рассмотренные выше операции осуществляются над отдельными битами позиционных двоичных чисел. Однако при логическом управлении системами почти всегда возникает необходимость вычислений. С этой целью в дополнение к логическим операциям в цифровой технике используют и операции, позволяющие производить простые арифметические действия над позиционными двоичными числами. Такие операции называют арифметическими. Это сложение, умножение и вычитание чисел. Основным отличием арифметической операции является различие количества разрядов операндов и результата. Так, арифметически складывая два двоичных числа, представляемых одним битом, можно получить следующие результаты: 0, 1, и 2. Последний результат не может быть представлен одним битом.

Потребуется дополнительный разряд — его называют разрядом переноса. В таблице истинности для арифметического сложения результат должен быть представлен в виде позиционного двоичного числа из двух битов: младший разряд y и старший — разряд переноса c :

Операнды		Результат	
x_1	x_0	c	y
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Оказывается, нет необходимости создавать специальные элементы для реализации арифметических операций. Разряд переноса — это просто конъюнкция операндов. А младший разряд запишем в виде ДНФ: $y = \bar{x}_1 \cdot x_0 + x_1 \cdot \bar{x}_0$. Схема, реализующая арифметическую операцию сложения битов, приведена на рис. 64. Создавая последовательное соединение таких схем, можно сконструировать схему для сложения чисел любой разрядности. Однако, как правило, ограничиваются числом разрядов, представляемых целой степенью двойки — четырех-, восьми-, шестнадцатиразрядные и выше. Функция y имеет самостоятельное значение. Для нее есть обозначение «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ» с латинским эквивалентом «XOR». При изображении логических схем управления для «XOR» используется символ, напоминающий символ логического сложения (рис. 65).

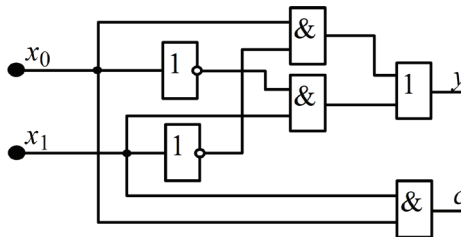


Рис. 64. Арифметическое сложение двух битов

Арифметические операции умножения могут быть реализованы с помощью левого сдвига двоичного числа (сдвиг на одну позицию влево увеличивает значение двоичного числа в два раза), дополненного операцией сложения при умножении на число, не являющееся степенью двойки.

Правый сдвиг позиционного двоичного числа на один разряд равносителен делению этого числа на 2. Выдвигаемые младшие разряды при этом теряются, то есть происходит округление результата к меньшему значению.

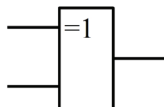


Рис. 65. «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ»

Для вычитания двоичных чисел используют сложение уменьшаемого с вычитаемым, представленным в дополнительном коде. Представление числа в дополнительном коде является аналогом отрицательного числа в арифметике. Для получения числа в дополнительном коде исходное число поразрядно инвертируют и к полученному результату арифметически прибавляют единицу. В качестве примера рассмотрим представление десятичного числа 7 в виде позиционного двоичного четырехразрядного числа 0111 и числа -7 в дополнительном коде 1001. Для обратного перехода нужно из числа в дополнительном коде вычесть единицу и оставшийся результат инвертировать. Старший разряд числа в дополнительном коде используется для хранения информации о знаке числа (1 — «минус», 0 — «плюс»), поэтому четырьмя разрядами нельзя представить числа по абсолютной величине больше 7, а восемью разрядами — больше 127.

5.4. Программируемые логические контроллеры

В современной автоматике нашли широкое применение программируемые логические контроллеры (ПЛК), на которых реализуется логическое управление технологическим оборудованием разного назначения.

5.4.1. Микропроцессоры

Программируемый логический контроллер (ПЛК) представляет собой специализированный вычислитель на базе микропроцессора, предназначенный для управления технологическими процессами

и различным оборудованием в реальном масштабе времени. Он является универсальным техническим средством, позволяющим в кратчайшие сроки создавать технические комплексы для различных областей применения.

Под термином «микропроцессор» обычно понимают часть аппаратного обеспечения компьютера или программируемого логического контроллера, отвечающую за выполнение логических и арифметических операций и координирующую работу всех устройств компьютера (контроллера). Микропроцессор в большой степени унаследовал архитектуру циклической обработки данных, разработанную еще в 1946 году Нейманом.

Устройство любого микропроцессора (МП) предполагает наличие следующих основных элементов (рис. 66):

- арифметико-логическое устройство — АЛУ — со сдвиговыми регистрами R_A и R_B , регистром-аккумулятором АКК и регистром признаков результата — РПР. На АЛУ возлагается задача выполнения логических и арифметических операций в соответствии с кодом операции, поступившим от устройства управления. Регистры сдвига и регистр-аккумулятор обеспечивают временное хранение данных при последовательной загрузке нескольких операндов и при необходимости выполнения рекурсий;
- для промежуточного хранения информации предусмотрены регистры общего назначения — РОН;
- управление потоком команд и данных реализуется через счетчик команд СК, регистр стека РСт, регистр адреса АДР и буферные регистры — буфер данных (БФД) и буфер адреса;
- взаимодействие всех элементов МП, дешифровку команд и выработку кода операции КОП для АЛУ обеспечивает устройство управления — УУ. Оно же обеспечивает взаимодействие с внешними элементами контроллера — синхронизацию от тактового генератора, обнаружение прерываний и реакции на них;
- между элементами МП данные и команды транспортируются через внутреннюю магистраль М.

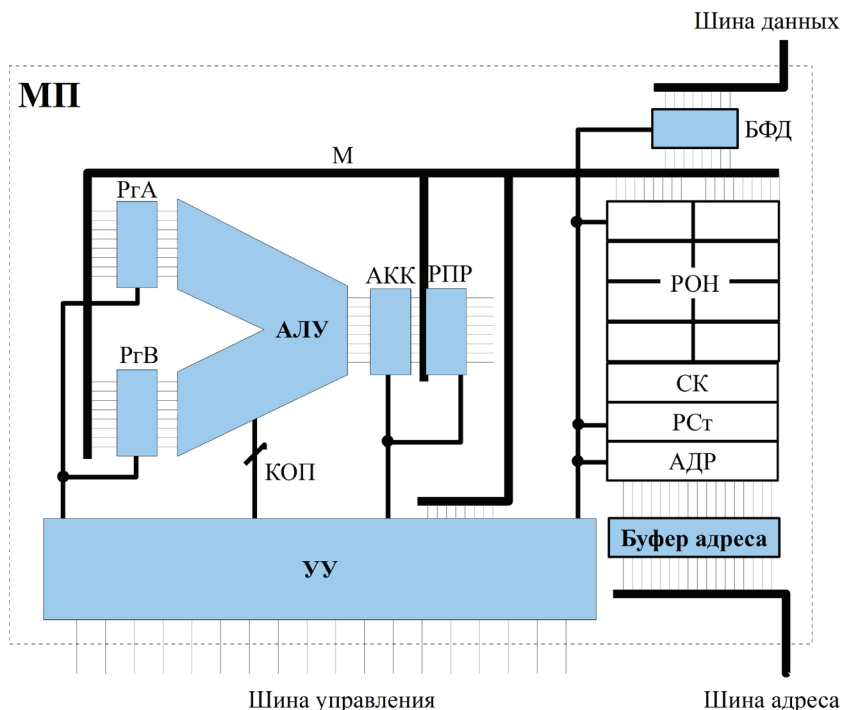


Рис. 66. Архитектура микропроцессора

Циклический процесс последовательной обработки данных с использованием приведенной архитектуры осуществляется следующим образом.

1. Число, находящееся в счетчике команд СК, переписывается в регистр адреса АДР. УУ через буфер адреса устанавливает это число на шину адреса и выставляет в шину управления сигнал чтения памяти.
2. Память, получив адрес и сигнал чтения, переписывает число, находящееся по данному адресу, на шину данных и выставляет сигнал готовности, по которому число фиксируется в регистре буфере данных БФД.
3. УУ читает число из буфера данных и анализирует его. Если это код команды, то из него выделяется код операции КОП и устанавливается на управляющем входе АЛУ. Если это операнды команды (данные), то они фиксируются в регистрах РгА и РгВ.
4. Когда данные готовы, УУ дает сигнал готовности АЛУ, по которому АЛУ выполняет операцию, код которой уже установлен, над данными, содержащимися в регистрах сдвига РгА и РгВ.

5. Результат записывается в регистр-аккумулятор, в регистре признаков устанавливаются важные признаки результата: переполнение, необходимость переноса, признак нулевого результата, признак отрицательного результата и другие. Для каждого признака в РПР отводится один бит с фиксированным номером.
6. По признакам результата может быть осуществлено разветвление выполнения последовательности команд. Если последняя команда является командой перехода, то при выполнении условия перехода вычисляется адрес перехода и его уменьшенное на единицу значение устанавливается в счетчик команд СК.
7. СК увеличивается на единицу: $СК = СК + 1$. Это означает выборку следующего адреса при отсутствии перехода или первого адреса новой последовательности команд при выполнении команды перехода.
8. Снова выполняется п. 1.

Этот цикл выполняется бесконечно с момента подачи питания в МП до выключения. Цикл может разветвляться по запросам внешних устройств — аппаратным прерываниям. По окончании обработки прерывания циклический процесс продолжается с той команды, перед которой произошло прерывание. Время выполнения каждого шага цикла определяется тактовой частотой процессора, задаваемой внешним по отношению к МП тактовым генератором, вырабатывающим непрерывную последовательность прямоугольных импульсов. Изменяя частоту генератора, можно влиять на быстродействие МП. Однако собственные свойства МП, емкости и индуктивности внутренних проводников, быстрота срабатывания транзисторов не позволяют сильно менять тактовую частоту, а следовательно, и быстродействие.

Развитие МП идет по пути увеличения разрядности данных и команд, изменения систем команд как в сторону усложнения, так и в сторону сокращения набора команд, увеличения числа ядер процессора, выполняющих параллельно несколько таких циклов одновременно. Однако принцип работы, заложенный архитектурой Дж. фон Неймана, остается прежним.

5.4.2. Контроллеры

На базе МП создаются разнообразные программируемые логические контроллеры. Наиболее крупными производителями контроллеров являются фирмы Siemens (контроллеры семейств Simatic S5 и Simatic S7), Rockwell Automation (Allen Bradley), Schneider Electric, Advantech, Omron. Появились и отечественные производители: «Овен», НПП «Автоматика-С», «Текон» и другие. Последнее время на рынке появляются японские и китайские производители.

Однако принципы устройства и работы всех контроллеров остаются подобными. Это связано с тем, что в системах управления технологическими объектами используются логические команды — работа с битами. Поэтому в ПЛК обеспечивается доступ к отдельным битам памяти, в то время как большинство процессоров и компьютеров обеспечивают только байтовую 2- или даже 4-байтную адресацию.

Нужно отметить, что в современных логических контроллерах арифметические числовые операции реализуются наравне с логическими. В частности, с помощью вычислительных процедур задаются законы регулирования, реализуется идентификация моделей управления, вычисляются параметры настройки. В ряде случаев используются в контроллерах алгоритмы преобразования Фурье и статистические оценки измерений. Но все-таки главная функция ПЛК — логическое управление технологическими процессами и оборудованием. При включении контроллера он переходит в бесконечный цикл выполнения программы, в котором с периодом цикла осуществляется опрос включенных в систему датчиков, анализ их состояния и выдача на выходы контроллера битов управления.

Состояние каждого опрашиваемого входа запоминается и сохраняется в памяти до следующего опроса. Во многих случаях сохранение информации обеспечивается и при отключении питания контроллера.

Время реакции контроллера зависит от продолжительности цикла опроса, поэтому при его применении нужно помнить, что отработка сигналов и команд не происходит мгновенно. Чем сложнее и разветвленнее программа, тем медленнее будет реакция контроллера. Поэтому создатели автоматики идут по пути создания распределенных систем — много простых контроллеров с простыми программами объединяют в сеть, в которой каждый контроллер выполняет узкую функцию.

Однако непростая задача распределения управления создает трудности при разработке таких систем, требуется глубокое понимание технологического процесса и (или) принципов работы технологического оборудования, последовательности выполнения операций и действий машин. Поэтому алгоритмы распределенного управления формируются при разработке конкретных технологических процессов и оборудования специалистами-технологами и механиками.

Алгоритмы управления при неправильном выборе параметров могут приводить к поломкам оборудования, вибрациям, быстрому износу оборудования, неприятным звуковым эффектам, вызывать появление дефектов.

Тем не менее, несмотря на приведенные трудности, цифровая автоматика переживает быстрый подъем. Это связано с быстрым снижением затрат на приобретение компонентов автоматики, наличием универсальных надежных решений, легким перепрограммированием и перенастройкой систем управления. Все это вместе обеспечивает гибкость производственных систем, позволяет быстро реагировать на изменения в рыночной конъюнктуре и поддерживать их прибыльность и техническую эффективность.

ПЛК позволяют создавать распределенные системы автоматики, конструировать сложные многоуровневые иерархические структуры, обеспечивающие сбор и хранение информации, управление в реальном времени, органическое включение в системы верхнего уровня, такие как АСУТП и АСУ. На рис. 67 приведен один из вариантов формирования автоматизированной системы на основе промышленных логических контроллеров Allen-Bradley.

Аналогичные системы могут быть созданы на базе контроллеров любых других конструкций и конфигураций. При этом обеспечивается модульный подход к коммуникациям, реализуемый при помощи зависимых контроллеров или локальных устройств, что дает возможность поддерживать несколько разных сетей в любом сочетании. Можно выбрать EtherNet/IP или иную открытую сеть. В таких системах обычно реализуется возможность удаленного конфигурирования и удаленной настройки локальных контроллеров, сервомеханизмов, параметров технологического процесса, а также обеспечивается мониторинг технологического процесса с требуемой степенью детализации.



Рис. 67. Подключение внешних устройств к сети ПЛК

Библиографический список

Используемый библиографический список

- 1 Николаев В. И. Системотехника: методы и приложения / В. И. Николаев, В. М. Брук. — Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 199 с.
- 2 Мороз А. И. Курс теории систем: Прикладная математика : учеб. пособие для вузов по специальности «Прикладная математика» / А. И. Мороз. — М. : Высшая школа, 1987. — 304 с.
- 3 Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. — М. : Техносфера, 2007. — 384 с.
- 4 Домрачев В. Г. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений : справ. пособие / В. Г. Домрачев, В. Р. Матвеевский, Ю. С. Смирнов. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 392 с.
- 5 Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. — М. : Горячая линия — Телеком, 2002. — 768 с.
- 6 Власов К. П. Теория автоматического управления : учеб. пособие / К. П. Власов. — Харьков : Гуманитарный центр, 2007. — 526 с.
- 7 Королев В. В. Управление процессами прокатного производства с помощью ЭВМ : учебное пособие для вузов / В. В. Королев. — М. : Металлургия, 1986. — 232 с.
- 8 Выдрин В. Н. Автоматизация прокатного производства : учеб. для вузов / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко. — М. : Металлургия, 1984. — 472 с.
- 9 Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М. : Наука, 1980. — 975 с.

Рекомендуемый библиографический список

Основы автоматизации управления производством : учеб. пособие для студентов технических вузов / под ред. И. М. Макарова. — М. : Высшая школа, 1983. — 504 с.

Глишков Г. М. Теоретические основы автоматического управления металлургическими процессами : учеб. пособие для вузов / Г. М. Глишков, М. Д. Климовицкий. — М. : Металлургия, 1985. — 304 с.

Солодовников В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. — М. : Машиностроение, 1985. — 536 с.

Автоматизация типовых технологических процессов и установок : учеб. для вузов / А. М. Корягин, Н. К. Петров, С. Н. Радимов, Н. К. Шапарев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 432 с.

Шалыто А. А. Логическое управление: Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов / А. А. Шалыто. — СПб. : Наука, 2000. — 780 с.

Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Дж. Пиани. — СПб. : Невский диалект, 2001. — 557 с.

Лурье Б. Я. Классические методы автоматического управления / Б. Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. — СПб. : БХВ-Петербург, 2004. — 640 с.

Васильев Е. М. Теория автоматического управления. Дискретные системы : учеб. пособие / Е. М. Васильев, В. Г. Коломыцев. — Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. — 145 с.

Волковой М. С. Автоматика и автоматизация производственных процессов : учеб. пособие / М. С. Волковой. — Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. — 145 с.

Замалетдинова Л. Я. Системы автоматического управления : учеб. пособие / Л. Я. Замалетдинова. — Казань : КНИТУ КАИ им. А. Н. Туполева, 2014. — 122 с.

Ключев А. О. Аппаратные средства информационно-управляющих систем : учеб. пособие / А. О. Ключев, П. В. Кустарев, А. Е. Платунов. — СПб. : Университет ИТМО, 2015. — 65 с.

Оглавление

Предисловие	3
Основные определения	4
1. Общие сведения об управлении техническими процессами и системами	5
1.1. Автоматизация контроля и управления	5
1.2. Основные задачи и направления автоматизации контроля и управления	6
2. Структурная и функциональная схемы управляемого объекта ...	11
2.1. Элементы теории систем и моделирования	11
2.1.1. Определение системы. Связи. Структура	13
2.1.2. Моделирование структуры. Графы	29
2.2. Системы управления технологическими процессами	36
2.2.1. Классификация систем	36
2.2.2. Общая структурная схема системы контроля и управления	40
3. Информация в системах контроля и управления	49
3.1. Первичные преобразователи информации — датчики (сенсоры)	49
3.2. Аналоговое и цифровое представление информации	54
3.2.1. Сигналы и информация	54
3.2.2. Каналы передачи сигналов	65
3.2.3. Помехи в информационных каналах. Характеристики каналов	67

4. Статика и динамика управляемых объектов.....	76
4.1. Статика и динамика. Функциональные схемы.....	76
4.2. Статика САР.....	79
4.2.1. Статические характеристики звена.....	79
4.2.2. Статическая характеристика соединения звеньев.....	82
4.3. Динамика САР.....	83
4.3.1. Элементарное динамическое звено.....	83
4.3.2. Порядок конструирования уравнения движения.....	90
4.3.3. Передаточная функция.....	97
4.4. Системы автоматического регулирования.....	111
5. Элементы цифровой автоматики.....	117
5.1. Теоретические основы цифровой автоматики.....	117
5.2. Представление и упрощение логических функций.....	124
5.2.1. Таблицы состояния и нормальные формы.....	124
5.2.2. Карты Карно.....	125
5.2.3. Упрощение логических функций.....	127
5.2.4. Пример логического управления.....	130
5.3. Арифметические операции с двоичными числами.....	133
5.4. Программируемые логические контроллеры.....	135
5.4.1. Микропроцессоры.....	135
5.4.2. Контроллеры.....	139
Библиографический список.....	142

Учебное издание

Паршаков Станислав Иванович
Ерпалов Михаил Викторович

**ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И СИСТЕМАМИ**

Редактор И. В. Меркурьева
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 17.01.2017. Формат 70×100/16.
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 6,64. Усл. печ. л. 11,9. Тираж 50 экз.
Заказ 4

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

